



# YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

## Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

# YUZUNCU YIL UNIVERSITY

## Journal of the Institute of Natural & Applied Sciences

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>

**ISSN: 1300 - 5413 / e-ISSN: 2667-467X**

**Yıl / Year : 2023**

**Cilt / Volume : 28**

**Sayı / Issue : 2**

**YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ /  
YUZUNCU YIL UNIVERSITY JOURNAL OF THE INSTITUTE OF NATURAL AND  
APPLIED SCIENCES**

**SAHİBİ / OWNER**

Prof. Dr. Hamdullah ŞEVLİ  
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Rektörü / Rector of Van Yuzuncu Yil University

**EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF**

Prof. Dr. Harun AKKUŞ  
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü / Director of Van Yuzuncu Yil  
University the Institute of Natural and Applied Sciences

**YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS**

Doç. Dr. Dilara ÖZTÜRK  
Doç. Dr. Ferda KARAKUŞ  
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÖZDEMİR

**YAYIN KURULU / EDITORIAL BOARD**

Prof. Dr. Burak DİKİCİ, Atatürk Üniversitesi  
Prof. Dr. Burak ORDİN, Ege Üniversitesi  
Prof. Dr. Cemil TUNÇ, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Prof. Dr. Csaba SZABO, Debrecen University  
Prof. Dr. Çağdaş Hakan ALADAĞ, Hacettepe Üniversitesi  
Prof. Dr. Emre ÇOMAK, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi  
Prof. Dr. Feyyaz DURAP, Dicle Üniversitesi  
Prof. Dr. Hasan BULUT, Fırat Üniversitesi  
Prof. Dr. Hüseyin KARAKUŞ, Dumlupınar Üniversitesi  
Prof. Dr. Hüseyin MERDAN, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Prof. Dr. Hüsnü KOÇ, Siirt Üniversitesi  
Prof. Dr. İsmail KASAP, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi  
Prof. Dr. Kenan SÖĞÜT, Mersin Üniversitesi  
Prof. Dr. Mehmet Ali KIRPIK, Kafkas Üniversitesi  
Prof. Dr. Mehmet Emin MERAL, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Prof. Dr. Mehmet Sait TAYLAN, Hakkari Üniversitesi  
Prof. Dr. Mubariz KARAEV, King Saud University  
Prof. Dr. Naci GENÇ, Yalova Üniversitesi  
Prof. Dr. Özdemir ADİZEL, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Prof. Dr. Özlem SELÇUK ZORER, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Prof. Dr. Rıdvan SARAÇOĞLU, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Prof. Dr. Sabri GÜL, Mustafa Kemal Üniversitesi  
Prof. Dr. Sedat YAYLA, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Prof. Dr. Semra DEMİR, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Doç. Dr. Alper HAMZADAYI, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Doç. Dr. Baran YOĞURTÇUOĞLU, Hacettepe Üniversitesi  
Doç. Dr. Barış ERDİL, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Doç. Dr. Çeknas ERDİNÇ, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Doç. Dr. Duygu YAŞAR ŞİRİN, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi  
Doç. Dr. Ekrem MUTLU, Kastamonu Üniversitesi



Doç. Dr. Emel ÖZ, Atatürk Üniversitesi  
Doç. Dr. Erdal AĞLAR, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Doç. Dr. Ferhat KIZILGEÇİ, Mardin Artuklu Üniversitesi  
Doç. Dr. Harun AYDIN, Hacettepe Üniversitesi  
Doç. Dr. Mohammed J. K. BASHİR, University of Tunku Abdul Rahman  
Doç. Dr. Memduh KARALAR, Bülent Ecevit Üniversitesi  
Doç. Dr. Nergiz YILDIZ YORGUN, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Doç. Dr. Onur ŞATIR, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Doç. Dr. Özal YILDIRIM, Fırat Üniversitesi  
Doç. Dr. Reza ABDİ-GHALEH, University of Bonab  
Dr. Öğr. Üyesi Altuğ KARABEY, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Atabak ELMİ, Deakin University  
Dr. Öğr. Üyesi Zehra Funda AKBULUT, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Dr. Danielle RODRIGUES MAGALHAES, Zaragoza University  
Dr. Madhumita MUKHOPADHYAY, Maulana Abul Kalam Azad University of Technology  
Dr. Müge ÜNAL ÇİLEK, Fırat Üniversitesi

### **İSTATİSTİK EDİTÖRÜ / STATISTICS EDITOR**

Prof. Dr. Abdullah YEŞİLOVA

### **DİL EDİTÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS**

Doç. Dr. Selçuk TOPAL  
Dr. Öğr. Üyesi Gül ŞEN  
Arş. Gör. Murat TURAN

### **MİZANPAJ EDİTÖRÜ / LAYOUT EDITOR**

Dr. Öğr. Üyesi Fikriye Şeyma KAYA

### **SEKRETER / SECRETARY**

Dr. Öğr. Üyesi Ogün Ozan VAROL

### **YAZI İŞLERİ / EDITORIAL AFFAIRS**

Arş. Gör. Ayşenur KALMER  
Arş. Gör. Bahar KALKAN  
Arş. Gör. Burak ÖZDEMİR  
Arş. Gör. Fadime KARADAŞ  
Arş. Gör. Murat TURAN  
Arş. Gör. Muhammed Coşkun IRMAK  
Mehmet ERZEN  
Zilan ŞİRP

### **YAZIŞMA ADRESİ / CORRESPONDENCE ADDRESS**

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 65080 Tuşba/VAN  
Van Yuzuncu Yil University the Institute of Natural and Applied Sciences, 65080  
Tuşba/VAN

**Telefon / Telephone:** +90 432 225 10 97

**Belgegeçer / Fax:** +90 432 225 11 23

**E-posta / E-mail:** fbedergi@yyu.edu.tr

**Cilt / Volume: 28**

**Sayı / Issue: 1**

**Web: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>**

**Basım Yeri ve Tarih / Published in: Van, 2023**

**DERGİ BİLGİLERİ / INFORMATION**

Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Yuzuncu Yil University Journal of the Institute of Natural and Applied Sciences

**ISSN 1300-5413 | e-ISSN 2667-467X | Yayın Aralığı Yılda 3 Sayı / 3 Issues Per Year**

## İçindekiler / Contents

### Fen Bilimleri ve Matematik / Natural Sciences and Mathematics

---

- Van Gölü Kıyı Kumlarından İzole Edilen Spathidiid Siliyatlar (Ciliophora,  
♦ Spathidiida) Üzerinde Morfolojik ve Moleküler Filogenetik Araştırmalar 345-358  
*N. Fırat DİCLE, İsmail YILDIZ*
- Antimicrobial, Antibiofilm and Antiurease Activities of Microbially  
♦ Synthesized Silver Nanoparticles against *Proteus mirabilis* 359-369  
*Sumeyra GURKOK, Murat OZDAL*
- Investigation of Structural, Elastic, and Piezoelectric Properties of NbSbO<sub>4</sub>  
♦ Crystal 370-382  
*Mehmet ERZEN*
- Approximation Properties of a Class of Kantorovich Type Operators  
♦ Associated with the Charlier Polynomials 383-393  
*Kerem GEZER, Mine MENEKŞE YILMAZ*
- A Block Conjugate Gradient Method for Quaternion Linear Systems 394-403  
♦ *Sinem ŞİMŞEK, Ayça KÖRÜKÇÜ*
- A Novel Membership Function Definition for Fuzzy Classification 404-411  
♦ *Nur UYLAŞ SATI*
- Parameterized Differential Transform Method and Its Application to  
♦ Boundary Value Transmission Problems 412-423  
*Merve YÜCEL, Fahreddin S. MUHTAROV*
- Cofinitely Semisimple (ss-) Lifting Modules 424-431  
♦ *Figen ERYILMAZ*
-



## Mühendislik ve Mimarlık / Engineering and Architecture

- 
- Fotovoltaik Uygulamalar İçin Kararlı Tek Eksenli Bir Güneş Takip Sistemi  
♦ Tasarımı ve Uygulaması 432-450  
*İsmail KAYRI*
- Öğrencilerin Siber Güvenlik Farkındalık Düzeylerinin Makine Öğrenmesi  
♦ Yöntemleri ile Belirlenmesi 451-466  
*Mahmut TOKMAK*
- Classification of Emotion with Audio Analysis 467-481  
♦ *Coşkucan BÜYÜKYILDIZ, İsmail SARITAŞ, Ali YAŞAR*
- Van İli Evsel Atıksu Arıtma Tesislerindeki Atıksu Karakteristiğinin ve Çıkış  
♦ Suyu Kalitesinin Değerlendirilmesi: Edremit ve Gevaş Örneği 482-494  
*Yunus Emre OKUMUŞ, Vahap YÖNTEN, Ayşe ÖZGÜVEN*
- Ampirik Mod Ayırıştırmasına Dayalı ARIMA Modeli Kullanılarak Van İli  
♦ Hava Kirliliğinin Tahmini 495-509  
*Erdinç ALADAĞ*
- Katı Faz Mikroekstraksiyon-Gaz Kromatografisi Metodu ile Malonaldehit  
♦ ve Hegzanal Tayini 510-523  
*Tahir YÜCEL, İsa CAVİDOĞLU*
- Soft Switching for MOSFET and IGBT-Based Hybrid DC-DC Boost  
♦ Converter 524-532  
*İbrahim Halil DİLBER, Hasan ÜZMUŞ, Mehmet Ali ÇELİK, Naci GENÇ*
- Farklı Dalgacık Dönüşümü Türleri Kullanılarak COVID-19'un Olay İlişkili  
♦ P300 Potansiyeli Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi 533-543  
*Onur Erdem KORKMAZ*
- Failure of Gedikbulak K-12 School Building on October 23, 2011, in Van,  
♦ Türkiye Earthquake 544-560  
*Halit Cenani MERTOL*

- ◆ Rijitlik Merkezinin Analitik, Deneysel ve Gözlemsel Değerlendirilmesi 561-582  
*Enes AKSOY, Fuat KORKUT, Barış ERDİL*
- ◆ Biyolojik Yöntemle Üretilmiş Gümüş Nanopartiküllerin In Vitro Koşullarda Digitalis purpurea Kallus ve Kök Oluşumları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi 583-590  
*Pınar NARTOP, Özge Nur YÜKSEL, Dilara Özge ŞENCAN*
- ◆ Characterization of Polymeric Wastes in the Hygienic Product Factory and Energy Recovery from These Wastes 591-619  
*Hatice KELEŞ, Yunus ÖNAL, Yeliz AKBULUT*
- ◆ DC01 Çeliğinin Sertliğine NDK Parametrelerinin Etkisinin Çoklu Regresyon Analiziyle İncelenmesi 620-628  
*Muhammed ELİTAŞ*
- ◆ Magnetron Sputtering ile Ti6AL4V Üzerindeki Gümüş Kaplamaların Korozyon ve Antibakteriyel Özelliklerinin Karşılaştırılması 629-640  
*Emrah MELETLİOĞLU, Recep SADELER*
- ◆ Investigation of Thermal Insulation Performance at Different Coating Thicknesses by Using Finite Volume Method 641-650  
*Bahadır Erman YÜCE, Serkan ÖZEL*
- ◆ The Effect of Phase Change Temperature of Graphite Matrix Composite on Small-Scale Li-Ion Package Performance Under Square Wave Load 651-666  
*Mustafa Yusuf YAZICI*
- ◆ Küresel Isınma Etkisi Altında Antik Kentlerin Mevcut Durum Analizi 667-683  
*Merve DENİZ, Ruşen YAMAÇLI*
- ◆ Dış Mekân Gölgeleme Elemanlarının Termal Konfor Koşullarına Etkilerinin Değerlendirilmesi 684-694  
*Fatih CANAN, Hande Büşra GEYİKLİ*
-

## Zirai Bilimler / Agriculture

- 
- ◆ Tek Yıllık Yabani Nohut Genotiplerinin Agronomik ve Morfolojik Özelliklerinin Biplot Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi  
*Fatma BAŞDEMİR, Sibel İPEKEŞEN, Murat TUNÇ, Leyla TURAN, Abdullah KAHRAMAN, B. Tuba BİÇER* 695-703
- ◆ Van'ın Erciş, Gevaş ve Edremit ilçelerinde Biber, Domates ve Kavundan Fusarium spp. ve Rhizoctonia spp.'nin Teşhisi ve Patojeniteleri  
*Necmettin TENİZ, Emre DEMİRER DURAK* 704-714
- ◆ Mısır Islahında İn Vivo Dihaploid Teknolojisi ile Saf Hat Geliştirilmesi  
*Mehmet YILDIRIM, Önder ALBAYRAK, Merve BAYHAN, Remzi ÖZKAN, Cuma AKINCI, Ferhat KIZILGEÇİ, Behiye Tuba BİÇER* 715-731
- ◆ The Applicability of Wheat SSR Markers to Analyzing the Molecular Diversity and Distribution of Orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) Genotypes from Eastern Anatolian Habitats  
*Ahmad NABHAN, Ösmetullah ARVAŞ, M. Alp FURAN* 732-744
- 

## Derleme / Review

- 
- ◆ Türkiye'de Konut Sorununun Toplu Konut Olgusu Üzerinden Dönemsel Olarak İncelenmesi  
*Mustafa GÜLEN* 745-761
- ◆ Süt ve Süt Ürünlerinde Kekik ve Kekik Uçucu Yağlarının Kullanımı  
*Mehmet Nihal YAMAN, Semih ÖTLEŞ, Özgül ÖZDESTAN OCAK* 762-774
- ◆ Epoksi Reçinelerde Kullanılan Alev Geciktirici Bileşikler  
*Kaan AKSOY* 775-802
-





## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Van Gölü Kıyı Kumlarından İzole Edilen Spathidiid Siliyatlar (Ciliophora, Spathidiida) Üzerinde Morfolojik ve Moleküler Filogenetik Araştırmalar #

N. Fırat DİCLE<sup>1</sup>, İsmail YILDIZ<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı, 65080, Van, Türkiye

<sup>2</sup> Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 65080, Van, Türkiye

N. Fırat DİCLE, ORCID No: 0000-0002-2864-8461, İsmail YILDIZ, ORCID No: 0000-0001-9986-0358

\*Sorumlu yazar e-posta: iyildiz@yyu.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 20.01.2023  
Kabul: 25.02.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1239915

#### Anahtar Kelimeler

18S rDNA gen dizisi,  
Filogeni,  
Morfoloji,  
*Spathidium* sp.  
Van Gölü

**Öz:** Bu çalışmada Van Gölü kıyı kumlarından izole edilen bir *Spathidium* türünün morfolojik ve 18S rDNA gen dizisine dayalı filogenetik özellikleri araştırıldı. Kültürlerde farklı morfoloji sergileyen üç siliyat popülasyonu gözlemlendi. Bu popülasyonların 18S rDNA gen bölgesine ait nükleotid dizilerinin benzer olduğu görüldü ve bunların aynı türün farklı gelişim evreleri olduğuna karar verildi. 18S rDNA gen bölgesine ait nükleotid dizilerine dayalı filogenetik analizlerde bu çalışmada izole edilen *Spathidium* sp.'nin hemcinslerinden ziyade *Lagnophrya acuminata*, *Enchelys gasterosterus* ve *Balantidion pellucidum* ile birlikte kümelendikleri görüldü. Spathidiid siliyatların morfolojik sınıflandırma sistemi ile moleküler filogenisi arasında çelişkiler mevcut olup, *Spathidium* cinsinin parafiletik bir takson olduğu görülmektedir. Bununla birlikte tür zengini *Spathidium* cinsinin pek çok türü ile ilgili gen dizisinin bilinmemesi bu taksonun moleküler filogenetik durumunun açıklığa kavuşturulmasını sınırlamakta olup, farklı habitatlardan izole edilecek ayrıntılı morfolojik veriler ile birlikte farklı gen bölgelerinin de kullanılacağı filogenetik analizlere ihtiyaç duyulmaktadır.

### Morphological and Molecular Investigations on Spathidiid Ciliates (Ciliophora, Spathidiida) Isolated from Coastal Sands of Lake Van

#### Article Info

Received: 20.01.2023  
Accepted: 25.02.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1239915

#### Keywords

18S rDNA gene sequence,  
Lake Van,  
Morphology,  
Phylogeny,  
*Spathidium* sp.

**Abstract:** In this study, we investigated the morphological characteristics and phylogenetic position based on the 18S rDNA gene sequence of the *Spathidium* species isolated from the coastal sands of Lake Van. Three populations of ciliates were observed, showing different morphology in cultures. Our results indicate that the nucleotide sequences of the 18S rDNA gene region of these populations were similar and they were different developmental stages of the same species. Phylogenetic analyses based on the nucleotide sequences of the 18S rDNA gene region showed that *Spathidium* sp. isolated in this study clustered together with *Lagnophrya acuminata*, *Enchelys gasterosterus*, and *Balantidion pellucidum* rather than their congeners. There are contradictions between the morphological classification system and molecular phylogeny of Spathidiid ciliates, and it is seen that the genus *Spathidium* is a paraphyletic taxon. However, the lack of nucleotide sequence data for many species of the species-rich genus *Spathidium* limits the elucidation of the molecular phylogenetic status of this taxon. Phylogenetic analyzes using different gene regions with the support of detailed morphological data to be isolated from different habitats will clarify this problem.

# Bu çalışma Doç. Dr. İsmail YILDIZ'ın danışmanlığında tamamlanan N. Fırat DİCLE'nin yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

## 1. Giriş

Spathidiid siliyatlar, dünyanın her tarafında karasal ve yarı karasal ortamlarda yaşayan avcı siliyatlar olup Ciliophora şubesi, Litostomatea sınıfı, Spathidiida takımı içerisinde sınıflandırılmaktadırlar (Foissner & Xu, 2007; Jang ve ark., 2017). Günümüze kadar 4 familya (Spathidiidae, Protospathidiidae, Arcuospathidiidae ve Apertospathidiidae) 20 kadar cins içerisinde morfolojik olarak tanımlanmış 250'den fazla tür ile temsil edilmekte olup bunların büyük çoğunluğu *Spathidium* cinsi içerisinde yer almaktadır (Foissner & Xu, 2007; Yıldız, 2018). *Spathidium* cinsi ilk kez 1841 yılında Dujardin tarafından tesis edilmiş spatula biçimli ve holotrich siliyatürlü (bütün vücut yüzeyi somatik siller ile örtülü) siliyatlar olarak tanımlanmıştır. Diğer spathidiid gruplarında olduğu gibi bu cinsin üyeleri de uzun yıllar hücre biçimi ve büyüklüğü, nüklear organizasyon ve özellikle oral morfoloji özelliklerine göre birbirlerinden ayırt edilmişlerdir.

Son yıllarda morfolojik çalışmalar ile paralel olarak yürütülen moleküler filogenetik çalışmalar Spathidiida takımının morfolojik sınıflandırma modellerinde bazı uyumsuzlukların bulunduğuna işaret etmektedir (Jang ve ark., 2015; Rajter & Vd'acný, 2016; Jang ve ark., 2017). Morfolojik sınıflandırma modellerine göre yakın ilişkili spathidiid siliyatların moleküler filogenetik ağaçlarda birlikte küme oluşturmadıkları ya da morfolojik olarak birbirinden farklı siliyatların moleküler filogenetik ağaçlarda birlikte kümelenedikleri gösterilmiştir (Vd'acný & Foissner, 2013; Vd'acný ve ark., 2014; Jang ve ark., 2015 ve 2017; Rajter & Vd'acný, 2016; Yıldız, 2018). Daha genel anlamda Spathidiida takımının sınıflandırmasında en büyük sorunlardan biri, kalabalık spathidiid cinslerinin (*Spathidium* Dujardin 1841; *Epispathidium* Foissner, 1984; *Arcuospathidium* Foissner, 1984) moleküler filogenetik çalışmalarda polifiletik olarak görülmesidir (Vd'acný ve ark., 2011 ve 2014; Vd'acný & Foissner, 2012 ve 2013; Rajter & Vd'acný, 2016).

Gerçekleştirilen bu çalışmada Van Gölü kıyı kumlarından izole edilen spathidiid siliyatlar canlı ve gümüş impregnasyon yöntemleri kullanılarak morfolojik ve morfometrik olarak incelendi, 18S rDNA gen bölgesinin karşılaştırılmasına dayalı filogenetik yöntemler kullanılarak moleküler filogenetik pozisyonları ortaya çıkarıldı. Elde edilen morfolojik ve moleküler verilerin benzerlik ve farklılıkları literatür bilgisi ile karşılaştırıldı.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Siliyatların toplanması, kültürlerin hazırlanması ve morfolojik yöntemler

Bu çalışmanın materyalini Van Gölü kıyı kumlarında yaşayan spathidiid siliyatlar oluşturmuştur. Kıyı kumu örnekleri Mart 2019-Haziran 2022 tarihleri arasında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi yerleşkesi içerisinde göl suyu tarafından nemlendirilen alanlardan bitkisel döküntüler ile birlikte kompozit olarak toplandı. Toplanan örnekler laboratuvarında gölgede bir ay kadar kurutulduktan sonra kilitli poşetler içinde serin ve karanlık ortamda muhafaza edildi. Kurutulmuş kum örnekleri Petri kabına konulup saf su ile doyurulduktan sonra içerisine bakteriyel gelişmeyi uyararak için karbonhidrat kaynağı olarak bir miktar irmik ilave edilerek Petri kültürleri hazırlandı (Foissner & Xu, 2007; Vd'acný & Foissner, 2012) 5-7 gün oda sıcaklığında direkt güneş ışığı almayacak ortamda inkübasyona bırakıldı.

Bu sürenin sonunda kültür kaplarından alınan 2-5 ml sıvı saat camına alınarak spathidiid siliyatlar stereo-mikroskop altında (10X-80X büyütme) gözlemlendi, morfolojik özellikleri ve yüzme davranışları kayıt altına alındı. Stereo-mikroskop altında kılcal cam pipetler ile toplanan siliyatlar daha yüksek büyütme (100X-100X büyütme) faz-kontrast ve diferansiyel interferens-kontrast mikroskoplarda incelendi (Foissner, 1991; Foissner ve ark., 1999; Foissner, 2014), görüntüleri kaydedildi ve çeşitli morfolojik karakterlerine ilişkin ölçümler alındı.

Nüklear organizasyon, oral ve somatik siliyatür gibi önemli taksonomik özelliklerin ortaya çıkarılması için kültürlerden izole edilen siliyatlara gümüş karbonat ve protargol boyama teknikleri uygulandı (Foissner, 1991; Foissner ve ark., 1999; Vd'acný & Foissner, 2012; Foissner, 2014). Boyanmış hücreler yüksek büyütme (400X-1000X) mikroskoplar altında incelendi, çeşitli morfolojik karakterlerine ilişkin ölçüm ve sayımlar yapıldı ve görüntüler kaydedildi. Canlı ve boyanmış örneklerin sayım ve ölçümlerinden elde edilen sayısal veriler Minitab 18 paket istatistik programında analiz edilerek tanımlayıcı istatistikler çizelge şeklinde özetlendi (Özdamar, 1999a ve 1999b).

## 2.2. Moleküler ve filogenetik yöntemler

Morfolojik olarak karakterizasyonu yapılmış 1-2 canlı hücre stereo-mikroskop altında kılcal pipet ile saat camından toplandıktan sonra muhtemel kontaminasyonlardan arındırmak için 4 kez saf su ile yıkandıktan sonra mümkün olan en az hacimdeki su ile (0.5-1 µL) birlikte 200 µL'lik tüplere aktarılıp DNA ekstraksiyonu yapıncaya kadar -65 °C'deki derin dondurucuda muhafaza edildi. Gen dizilerinin kalitesi ve güvenilirliği için her örnekten en az 5 tüp örnek alınarak muhafaza edildi. Genomik DNA'nın daha kolay elde edilmesi için hücre pelikülünü parçalamak amacıyla dondurucuda saklanan örnekler oda sıcaklığında 10 dk çözüldükten sonra 15 dk boyunca tekrar donduruldu. Bu dondurup çözme işlemi 10 kez tekrarlandıktan sonra genomik DNA kimyasal olarak ekstrakte edildi. DNA kimyasal olarak RedExtrakt-N-Amp Tissue PCR Kit (Sigma, St. Louis, MO, USA) ile izole edildi. İzolasyon işlemi üretici firmanın belirtmiş olduğu protokoldeki miktarlar 1/10 oranında kullanılarak 200 µL'lik tüp içerisinde gerçekleştirildi (Gong ve ark., 2007; Shazib ve ark., 2016; Yıldız, 2018 ve 2021). 18S rDNA gen bölgeleri EukA (5'-AAC CTG GTT GAT CCT GCC AG-3') ve EukB (5'-TGA TCC TTC TGC AGG TTC ACC TAC-3') evrensel primerleri kullanılarak PZR (Polimeraz Zincir Reaksiyonu) ile gerçekleştirildi. PZR koşulları, 1 döngü 2 dakika 94 °C'de başlangıç denatürasyonu; 40 döngü 45 saniye 95 °C'de denatürasyon 1 dakika 60 °C'de primer bağlanması, 3 dakika 72 °C'de uzama; 1 döngü 10 dakika 72 °C'de son uzama olarak ayarlandı. PZR ürünlerinin doğruluğu, kalitesi ve miktarı DNA belirteci (marker) eşliğinde jel elektroforezinde kontrol edildi. Yeterli miktarda ve doğrulukta DNA elde edilen PZR ürünlerinden her bir spathidiid örneği için 2 PZR ürünü seçilerek dizilendi. Dizileme işlemi için PZR primerleri (EukA, EukB) ile bir iç primer (SR7R=5'-AGT TAA AAA GCT CGT AGT GT-3') kullanıldı. Her bir siliyat popülasyonu için 2 PZR ürünü dizilendi. PZR ürünlerinin saflaştırma ve dizileme işlemi BM laboratuvar Sistemleri'nde (Ankara, Türkiye) gerçekleştirildi.

ABI formatında elde edilen diziler CodonCode Aligner ver. 9.0.1 (Centerville, MA, USA) programında kromatogramlar kontrol edildi, iyi kalitede okunmuş bölgeler hizalanarak konsensüs dizileri elde edildi.

Bu çalışmada elde edilen gen dizisi ile GenBank'tan elde edilen siliyatların gen dizileri (GenBank'tan elde edilen dizilerin assesion numaraları Şekil 7'de gösterilmiştir) Mega7 programında Clustal W implement algoritması kullanılarak hizalandı (Tamura ve ark., 2013; Kumar ve ark., 2016). Anormal hizalanmış bölgeler gblocks v. 091 programı kullanılarak uzaklaştırıldı (Talavera & Castresana, 2007). Hizalanmış gen dizileri için en uygun baz değişim modeli JModeltest kullanılarak GTR+G+I olarak belirlendi (Posada, 2008; Darriba ve ark., 2012). Bayesian çıkarsaması (BI) ile oluşturulan filogenetik ağaçlarda bu baz değişim modeli kullanıldı. Bayesian çıkarsaması 3.000.000 jenerasyon ve her 100 jenerasyonda 1 örnekleme yapılacak şekilde dizayn edildi (Ayres ve ark., 2012; Ronquist ve ark., 2012). Elde edilen filogenetik ağacın ilk ve son %25'lik kısmı yakılarak kalan ağaçlardan konsensüs ağacı oluşturuldu. Maksimum olabilirlik analizi (ML) hizalanmış gen dizilerinden IQ-Tree v.1.6.3 programı kullanılarak yapıldı (Nguyen ve ark., 2015; Hoang ve ark., 2018). ML analizi için en uygun model IQ-Tree programı tarafından seçilen GTR+F+I+G4 modeli ile 1.000 bootstrap olarak yapıldı. Her iki algoritma ile elde edilen filogenetik ağaçlar (BI ve ML) Figtree v1.4.4 (<http://tree.bio.ed.ac.uk/software/figtree/>) programı ile incelendikten sonra tek bir ağaç (ML ağacı) üzerinde nod değerleri ile birlikte birleştirildi.

## 3. Bulgular

### 3.1. Morfolojik bulgular

Yapılan morfolojik incelemelerde, kültürlerde birbiri ardınca ortaya çıkan üç farklı Spathidiid siliyat popülasyonu (popülasyon 1-3) gözlemlendi. Bu popülasyonların hücre büyüklüğü, biçimi, nükleer organizasyon bakımından birbirlerinden bariz bir şekilde farklı oldukları belirlendi ve her popülasyonun morfolojik ve morfometrik karakterleri aşağıda verilmiştir.



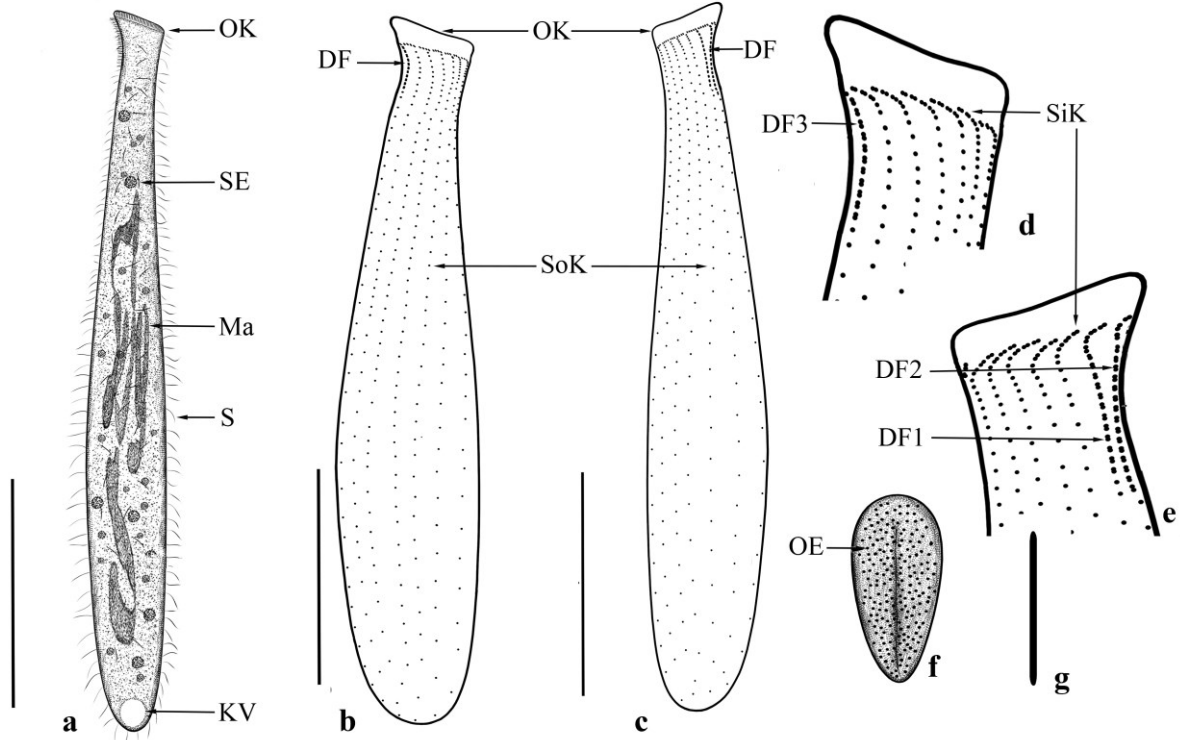
### 3.1.1. *Spathidium* sp. popülasyon 1

Petri kültürlerinde ilk çoğalan spathidiid siliyat popülasyonu olup kültürün 5-7. günleri arasında gözlemlendi. Hücre şekli uzamış vazo biçimlidir (Şekil 1a, 1d, 2a). Esnek pelikül yapısına sahip olan hücreler ileri derecede kıvrılabilme yeteneğine sahiptir (Şekil 1b, 1c). Lateral olarak 2-3:1 oranında yassılaştırmıştır. Oral kabartı 5-6  $\mu\text{m}$  yüksekliğinde ve 20-25  $\mu\text{m}$  uzunluğunda olup ventrale doğru yaklaşık  $45^\circ$  açı yapacak biçimde eğiktir (Şekil 1a-1c, 2a). Canlı hücre uzunluğu 172  $\mu\text{m}$  (160-198  $\mu\text{m}$ ), hücre genişliği en dar bölge olan oral apareyin posteriyöründe 15  $\mu\text{m}$  (14-20  $\mu\text{m}$ ); en geniş bölge olan posteriyör yarımında 25  $\mu\text{m}$  (20-31  $\mu\text{m}$ ) olarak ölçüldü (Çizelge 1). Protargol impregnasyonu uygulanmış örneklerde hücreler fiksasyon sürecinde bir miktar çektiklerinden dolayı daha küçük olarak ölçüldü. Sitoplazma renksiz ve yoğun granüllüdür. (Şekil 1a-1c, 2a). Posteriyörde, terminal olarak konumlanmış veziküler yapıda tek kontraktıl vakuole sahiptir (Şekil 1a, 2a). Ekstruzomlar 7-8  $\mu\text{m}$  uzunluğunda, 1  $\mu\text{m}$  kalınlığında, çubuk biçimli olup (Şekil 2g) yoğun olarak oral kabartı içerisinde, seyrek olarak da sitoplazmada dağılık olarak bulunurlar (Şekil 1d, 1e, 2a). Makronükleus 4-7  $\mu\text{m}$  genişliğinde tek veya çok parçalı (4-14) uzun kıvrılmış şerit biçiminde olup hücre içerisinde geniş (43-86  $\mu\text{m}$ ) yer kaplar (Şekil 1d, 2a). Çapı 2  $\mu\text{m}$  kadar olan küresel biçimli 1-2 mikronükleusa sahiptir.



Şekil 1. *Spathidium* sp. popülasyon 1'in fotomikrografları. a-c, canlı; d-f, gümüş impregnasyonu. DF: dorsal fırça; KV: kontraktıl vakuol; Ma: makronükleus; OE: oral ekstruzom; OK: oral kabartı; E: somatik ekstruzom. Barlar 100  $\mu\text{m}$ 'dir.

Somatik siller 8-10  $\mu\text{m}$  uzunluğunda olup meridyonel olarak düzenlenmiş 14-16 kineti (sil sırası) oluştururlar (Şekil 2b, 2c; Çizelge 1). Monokinetal olarak organize olmuş kinetilerin anteriyör uçlarındaki kinetozomlar (sil kaide cisimcikleri) sık olarak düzenlenmişken posteriyöre doğru seyrekleşir, posteriyör kutup sil taşımaz. Hücrenin dorsalinde yer alan somatik sillerin 3 tanesinin anteriyör uçları dikinetid şeklinde farklılaşarak dorsal fırçayı oluşturur (Şekil 1f, 2b-e). Dorsal fırça dikinetidleri somatik sillerden farklı olarak kısa (1.5-2.0  $\mu\text{m}$ ) kıl benzeri yapılar taşır. Her bir dorsal fırçanın (D1-D3) uzunlukları Çizelge 1'de verilmiştir. Oral siliyatür somatik kinetilerin anteriyör uçlarının farklılaşmasından meydana gelmiş olup, oral kabartının kaidelerini çevreleyen kinetofragmentlerden oluşan sirkamoral kineti şeklindedir (Şekil 2d, 2e). Sirkamoral kinetiği oluşturan kinetozomlardan orijinlenen siller somatik sillerden hafif derecede daha uzun olup 12-13  $\mu\text{m}$  olarak ölçüldü.

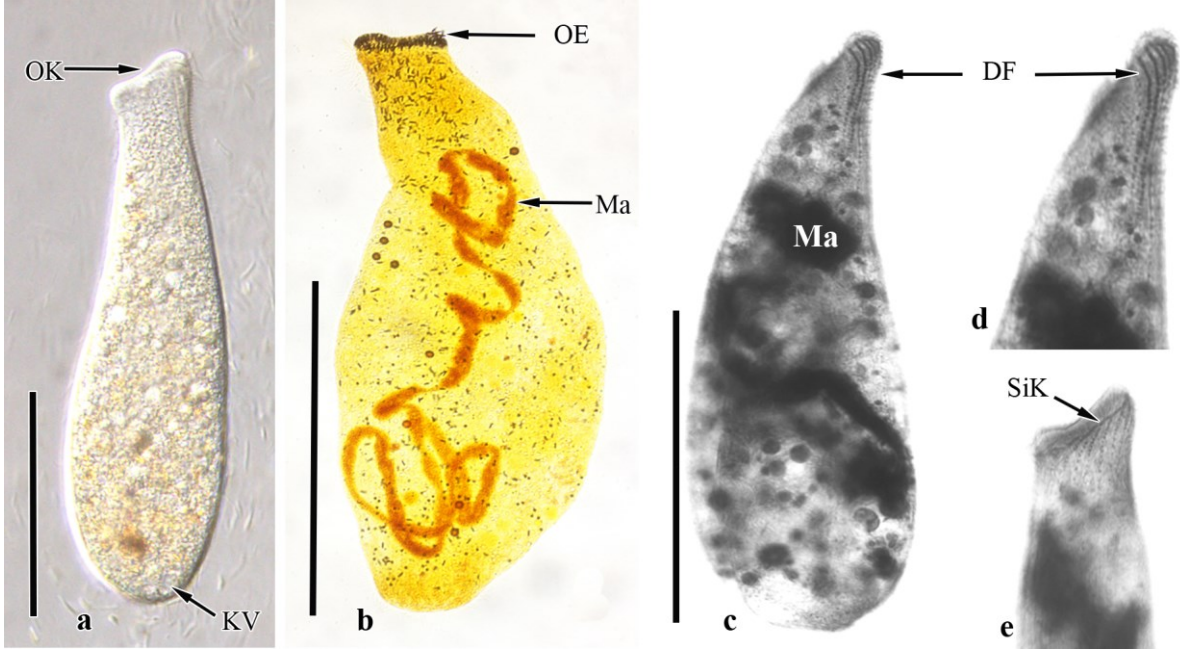


Şekil 2. *Spathidium* sp. popülasyon 1'nin genel morfoloji ve infrasiliyatür diyagramları. a: canlı hücre, b, c: sağ ve sol lateral siliyatür diyagramı; d, e: sağ ve sol oral siliyatür diyagramı; f: oral kabartının üst görünüm diyagramı; g: oral ve somatik ekstruzom diyagramı. BV: besin vakuolu, DF: dorsal fırça; DF1-3, dorsal fırça 1-3; KV: kontraktıl vakuol; Ma: makrotüküs; OE: oral ekstruzomlar; OK: oral kabartı; S: sil; SE: sitoplazmik ekstruzom; SiK: sirkamoral kineti; SoK: somatik kineti. Barlar 50 µm'dir.

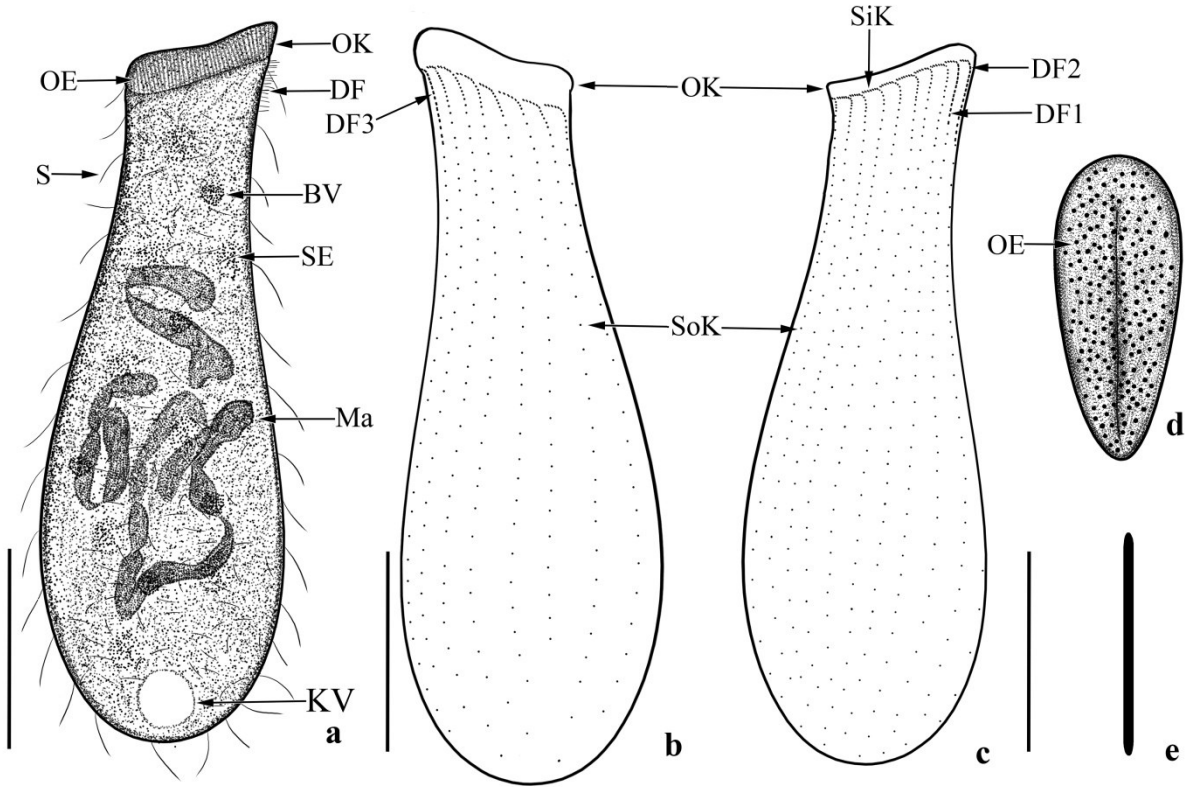
### 3.1.2. *Spathidium* sp. popülasyon 2

Petri kültürlerinde popülasyon 1'den sonra kültürün 7-10. günleri arasında gözlemlendi. Hücre şekli genişçe vazo biçimlidir (Şekil 3a-c, 4a-c). Hücre pelikülü hafif derecede esnek olmakla birlikte popülasyon 1 hücreleri gibi ileri derecede kıvrılmalar oluşmaz. Lateral olarak 2:1 oranında yassılaştırmıştır. Oral kabartı yüksekliği 4-8 µm, genişliği ise 22-27 µm olarak ölçülmüş olup ventrale doğru 20°-30° açı yapacak şekilde eğiktir (Şekil 3a, 4a-c). Canlı hücre uzunluğu 147 µm (140-160 µm), hücre genişliği ise en dar bölge olan oral aparatın posteriyöründe 20 µm (17-27 µm), en geniş bölge olan posteriyör yarımda 31 µm (27-36 µm) olarak ölçüldü. Sitoplazmik görünüm, besin vakuolleri ve kontraktıl vakuol önceki popülasyona benzerdir. Ekstruzomların büyüklüğü 9-10 µm uzunluğunda, 1 µm kalınlığında ve hücre içindeki dağılımı popülasyon 1'deki ile benzerdir. Nüklear organizasyon popülasyon 1 ile benzer olup ölçüm sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Somatik siller 7-10 µm uzunluğunda olup 20 (16-24) kineti oluşturur. Somatik ve oral siliyatür genel organizasyon bakımından önceki popülasyona benzerdir. Dorsal fırça uzunlukları ve kinetozom çifti sayıları Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 3. *Spathidium* sp. popülasyon 2'nin fotomikrografları a, canlı; b-e, gümüş impregnasyonu. DF: dorsal fırça; KV: kontraktıl vakuol; Ma: makronükleus; OE: oral ekstruzomlar; OK: oral kabartı; SiK: sirkamoral kineti. Barlar 60 µm'dir.



Şekil 4. *Spathidium* sp. popülasyon 2'nin genel morfoloji ve infrasiliyatür diyagramları. a: canlı hücre, b, c: sağ ve sol lateral siliyatür diyagramı; d: oral kabartının üstten görünümü; e: ekstruzom. BV: besin vakuölü; DF: dorsal fırça; DF1-3: dorsal fırça 1-3; KV: kontraktıl vakuol; Ma: makronükleus; OE: oral ekstruzom; OK: oral kabartı; S: sil; SE: sitoplazmik ekstruzom; SiK: sirkamoral kineti; SoK: somatik kinetozom. Barlar 50 µm'dir.



Çizelge 1. *Spathidium* sp. 1-3 popülasyonlarının morfometrik karakterizasyonu

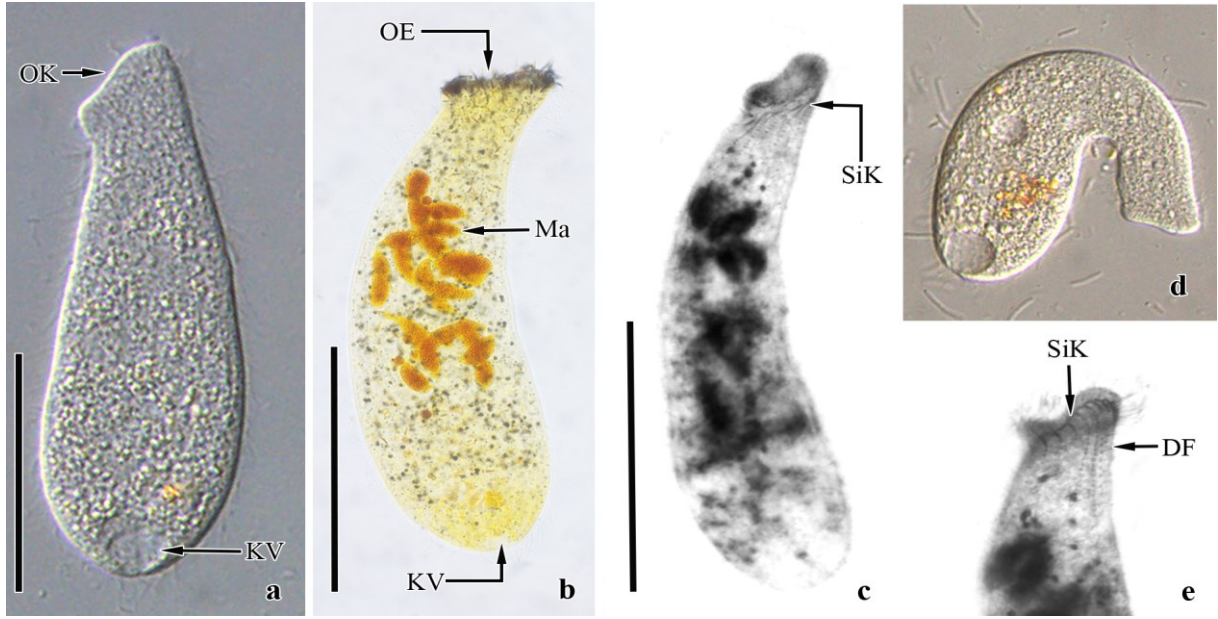
Karakterler	P	$\bar{X}$	Min	Max	SS	SH	VK	N
Hücre uzunluğu	1	135.86	120.00	151.00	8.79	1.87	6.47	22
	2	135.97	125.00	154.00	7.98	1.37	5.87	34
	3	93.74	79.00	110.00	8.18	1.40	8.72	34
Minimum hücre genişliği (A)	1	11.41	8.00	17.00	2.18	0.46	19.06	22
	2	16.59	12.00	21.00	1.99	0.34	11.98	34
	3	12.94	8.00	16.00	2.16	0.37	16.69	34
A/Hücre uzunluğu (%)	1	8.46	5.63	12.50	1.83	0.39	21.68	22
	2	12.23	9.23	15.62	1.54	0.26	12.63	34
	3	13.53	1.30	17.65	3.17	0.54	23.45	34
Maksimum hücre genişliği (B)	1	20.68	18.00	35.00	4.13	0.88	19.99	22
	2	37.44	28.00	47.00	5.21	0.89	13.90	34
	3	26.38	16.00	36.00	5.50	0.94	20.87	34
B/Hücre uzunluğu (%)	1	15.36	11.27	29.17	3.79	0.81	24.70	22
	2	27.61	20.83	36.15	4.06	0.70	14.71	34
	3	27.58	2.70	43.75	7.48	1.28	27.14	34
Makronükleus şekil boyu (C)	1	60.45	43.00	86.00	12.37	2.64	20.46	22
	2	74.29	55.00	100.00	11.47	1.97	15.43	34
	3	48.21	38.00	62.00	7.25	1.24	15.04	34
C/Hücre uzunluğu (%)	1	44.52	29.05	60.56	8.41	1.79	18.89	22
	2	54.78	38.41	75.76	8.78	1.51	16.03	34
	3	50.33	4.54	68.75	10.54	1.81	10.95	34
Makronükleus genişliği	1	5.50	4.00	7.00	0.74	0.16	13.45	22
	2	5.26	4.00	7.00	0.67	0.11	12.64	34
	3	4.32	3.00	6.00	0.68	0.12	15.82	34
Makronükleusun anteriyör uçtan uzaklığı	1	40.95	26.00	54.00	7.57	1.61	18.48	22
	2	29.15	19.00	40.00	4.85	0.83	16.64	34
	3	25.22	18.00	35.00	4.18	0.74	16.57	32
Makronükleus parça sayısı	1	8.86	4.00	14.00	2.34	0.50	26.35	22
	2	13.59	9.00	18.00	2.54	0.45	18.67	32
	3	13.23	7.00	18.00	2.64	0.56	19.92	22
Mikronükleus çapı	1	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	3
	2	2.56	2.00	3.00	0.51	0.13	19.99	16
	3	2.18	2.00	3.00	0.40	0.12	18.54	11
Mikronükleus sayısı	1	1.33	1.00	2.00	0.58	0.33	43.30	3
	2	1.82	1.00	3.00	0.73	0.18	39.90	17
	3	1.89	1.00	3.00	0.47	0.11	24.96	18
Somatik kineti sayısı	1	15.33	14.00	16.00	1.16	0.67	7.53	3
	2	20.17	16.00	24.00	2.82	0.81	14.00	12
	3	18.30	14.00	24.00	2.70	0.60	14.74	20
DF1 uzunluğu	1	20.00	18.00	22.00	2.00	1.15	10.00	3
	2	18.20	16.00	21.00	2.17	0.97	11.91	5
	3	11.00	8.00	15.00	2.00	0.55	18.18	13
DF2 uzunluğu	1	20.00	18.00	22.00	2.00	1.15	10.00	3
	2	20.50	18.00	22.00	1.76	0.72	8.59	6
	3	15.79	13.00	22.00	2.33	0.62	14.74	14
DF3 uzunluğu	1	20.67	19.00	23.00	2.08	1.20	10.07	3
	2	18.50	17.00	20.00	1.05	0.43	5.67	6
	3	16.43	14.00	24.00	2.53	0.68	15.42	14

$\bar{X}$ : aritmetik ortalama; Max: maksimum değer; Min: minimum değer; N: birey sayısı; P: popülasyon; SH: standart hata; SS: standart sapma; VK: varyasyon katsayısı.

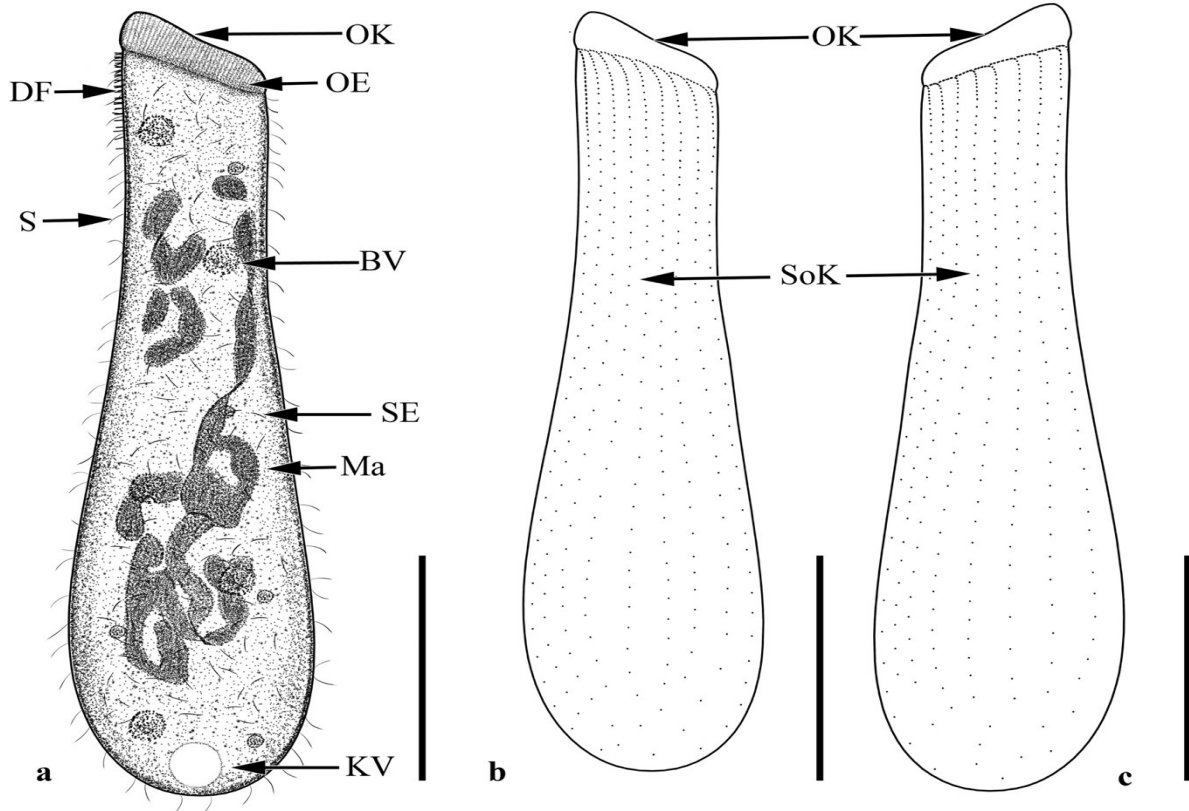
### 3.1.3. *Spathidium* sp. popülasyon 3

Petri kültürlerinde popülasyon 2'den sonra kültürlerin 10-15 günleri arasında gözlemlendi. Hücre şekli vazo biçimlidir (Şekil 5a-c, 6a-c). Hücre pelikülü ileri derecede esnek olup uzun eksenini boyunca geriye doğru "U" şeklinde kıvrılabildikleri gözlemlendi (Şekil 5d). Lateral olarak 2:1 oranında yassılaştırmıştır. Oral kabartı 4-5  $\mu\text{m}$  yüksekliğinde 15-18  $\mu\text{m}$  genişliğinde olup vücut eksenini ile 30°-45° açı yapacak şekilde konumlanmıştır (Şekil 5a, 6a). Canlı hücreler 109  $\mu\text{m}$  (68  $\mu\text{m}$ -129  $\mu\text{m}$ ) en dar bölgenin genişliği 14  $\mu\text{m}$  (9-17  $\mu\text{m}$ ), en geniş bölgesi ise 25  $\mu\text{m}$  (16-30  $\mu\text{m}$ ) olarak ölçüldü. Protargol impregnasyonlu hücrelerden elde edilen ölçümler Çizelge 1'de verilmiştir. Sitoplazmik görünüm, besin vakuelleri, kontraktıl vakuol ve ekstruzomlar önceki popülasyonlara benzerdir. Makronüklear

organizasyon önceki popülasyonlardan farklı olarak şerit biçiminde değil, küçük nodüllerden oluşan çok parçalı oldukları görüldü (Şekil 5b, 6a).



Şekil 5. *Spathidium* sp. popülasyon 3'ün fotomikrografları. a, d, : canlı, b, c, e: gümüş impregnasyonu. BV: besin vakuölü; DF: dorsal fırça KV: kontraktıl vakuöl; Ma: makronükleus OE: oral ekstruzom; OK: oral kabartı; SiK: sirkamoral kineti. Barlar 50 µm'dir.

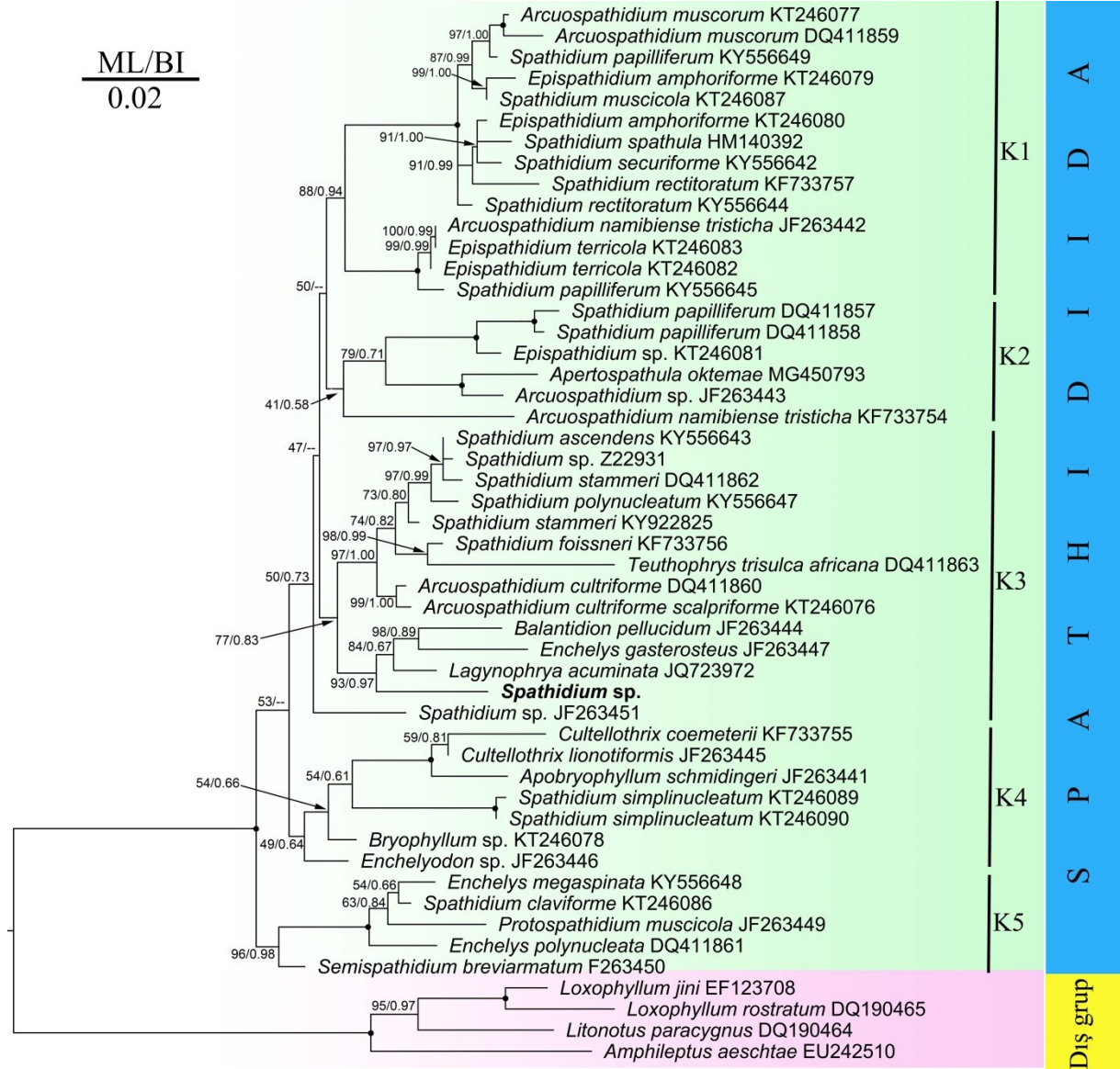


Şekil 6. *Spathidium* sp. popülasyon 3'ün genel morfolojisi ve infrasiliyatür diyagramları. a: canlı hücre, b, c: sağ ve sol lateral siliyatür diyagramı. BV: besin vakuölü; DF: dorsal fırça; KV: kontraktıl vakuöl; Ma: makronükleus; OE: oral ekstruzom; OK: oral kabartı; S: sil; SE: sitoplazmik ekstruzom; SoK: somatik kinetozom. Barlar 50 µm'dir.

Somatik siller 9-10 µm uzunluğunda olup 18 (14-24) kineti oluştururlar (Şekil 6b-c). Somatik ve oral siliyatürün genel organizasyonu önceki popülasyonlar ile benzer olup, dorsal fırça ile ilgili uzunluk ve kinetozom çifti sayıları Çizelge 1’de verilmiştir.

### 3.2. Moleküler veriler ve filogenetik analizler

Morfolojik olarak ayırt edilen her üç popülasyonun (*Spathidium* sp. popülasyon 1-3) 18S rDNA gen bölgelerinin nükleotid dizileri ortaya çıkarıldı; 1 numaralı popülasyon için 1541, 2 numaralı popülasyon için 1576, 3 numaralı popülasyon için 1564 baz çifti okunmuştur. Her üç popülasyondan elde edilen gen dizilerindeki guanin ve sitozinlerin (G+C) toplam nükleotidlerin %43.5’ini oluşturdukları görüldü.



Şekil 7. Spathidiid siliyatların 18 S rDNA gen dizisine dayalı filogenisi. Bu çalışmada izole edilen *Spathidium* sp. ağaç üzerinde koyu olarak gösterilmiştir. Nod değerlerindeki çift tire (--) Bayesian çıkarsaması ile elde edilen ağaçta bu kolun mevcut olmadığına işaret etmektedir. Bar her 100 nükleotidde 2 baz değişimini göstermektedir.

Her popülasyondan elde edilen 18S rDNA gen dizileri hizalandığında nükleotidlerin birbirleri ile %100 eşleştikleri, delesyon, insersiyon, transversiyon ya da transisyon tarzında baz değişimlerinin bulunmadığı, Kimura 2 parametre modeline göre yapılan analizlerde popülasyonlar arasında farkın



(0.000) bulunmadığı görüldü, gözlenen her bir farklı morfolojik popülasyonun aynı türün farklı gelişim aşamaları olduğuna karar verildi. Elde edilen morfolojik veriler ile, bu çalışmada izole edilen *Spathidium* popülasyonu daha önce tanımlanmış hiçbir türe dahil edilemediğinden *Spathidium* sp. olarak verildi.

*Spathidium* sp.'nin 18S rDNA geninin nükleotid dizileri GenBank'ta (NCBI) kayıtlı diğer siliyatların gen dizileri ile karşılaştırıldığında (BLAST) en çok *Lagnophrya acuminata*'ya (JQ723972) benzer olduğu, 1564 nükleotidden 1541'inin benzer olduğu ve benzerliğin %99 olduğu belirlendi.

Bu çalışmada izole edilen *Spathidium* sp. popülasyonunun filogenetik durumunun açıklığa kavuşturulması için maksimum olabilirlik (ML) ve Bayesian çıkarsaması (BI) analizlerinde GenBank'tan (NCBI) alınan 18S rDNA gen dizilerinin kayıt numaraları filogenetik ağaç üzerinde gösterilmiştir (Şekil 7). Filogenetik analizlerde Spathidiida takımı üyelerine ek olarak dış grup olarak bu takım ile en yakın ortak atadan ayrılan klad (küme) olan Pleurostomatida takımı üyeleri seçildi. Her iki algoritma ile (ML ve BI) oluşturulan filogenetik ağaçlar genel topoloji bakımından birbirleri ile çok yüksek oranda benzer olduklarından filogenetik analiz ML ağacı üzerinde her iki algoritmanın nod değerleri verilerek sunulmuştur. Filogenetik ağaçlarda her iki algoritma ile tam olarak desteklenen nodlar koyu nokta olarak belirtildi.

Her iki algoritma ile (ML ve BI) üretilen filogenetik ağaçta da Spathidiida takımı üyeleri ile dış grup olarak kullanılan Pleurostomatida takımı üyelerinin tam destek ile (ML=100, BI=1.00) ile birbirlerinden ayrıldıkları görüldü (Şekil 7). Bununla birlikte Spathidiida içerisinde yer alan taksonların filogenetik ağaç içerisinde monofiletik gruplar oluşturmadıkları, siliyatların morfolojik sınıflandırma sisteminden farklı olarak 5 ana klad (K1-K5) ve bu kladlar ile ilişkili alt kladlar oluşturdukları görüldü. Her bir klad içerisinde farklı familya ve cinslere ait siliyatlar yer aldığı gibi, aynı cins veya türe ait üyelerin birbirinden farklı kladlarda ve uzak olarak konumlanmış oldukları görüldü. Filogenetik ağaçta *Spathidium* cinsine ait türlerin 5 kladın tamamında diğer organizmalar ile birlikte kümelenmiş olarak görüldü.

Bu çalışmada elde edilen *Spathidium* sp. popülasyonu (filogenetik ağaç üzerinde koyu olarak gösterilmiştir) K3 kladı içerisinde konumlanmış olup diğer *Spathidium* türlerinden ziyade *Lagnophrya acuminata* (JQ723972), *Enchelys gasterosterus* (JF263447) ve *Balantidion pellucidum* (JF263444) ile daha yakın ilişkili oldukları görüldü.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

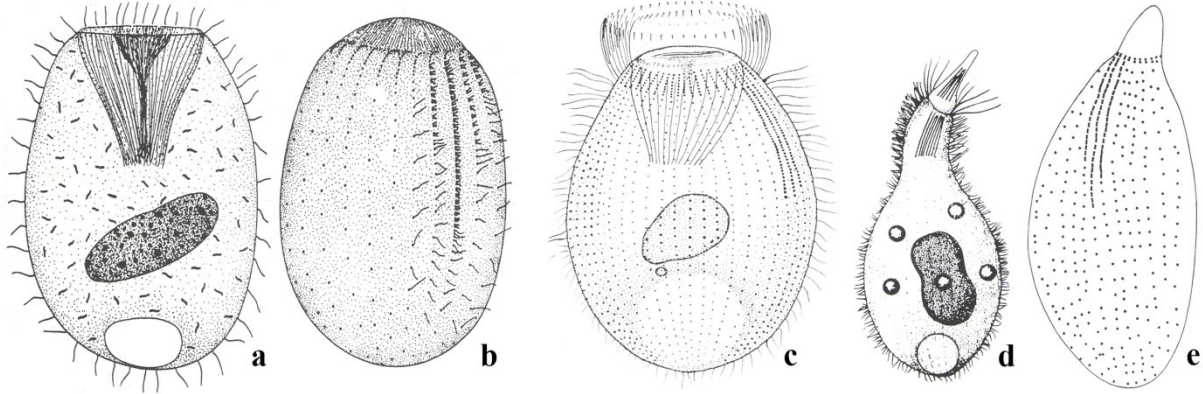
Spathidiid siliyatların keşfinden günümüze kadar 250'nin üzerinde morfo-türü tespit edilmiş ve tanımlanmıştır (Foissner & Xu, 2007; Yıldız, 2018). Siliyat taksonomisi ile ilgili çalışmalar uzun yıllar homolojiyi yansıttığı kabul edilen morfolojik karakterler (apomorfik karakter) üzerinden yürütülmüştür (Lynn & Small, 2000; Corliss, 2001; Adl ve ark., 2005; Foissner & Xu, 2007). Spathidiid siliyatların taksonomisinde kullanılan morfolojik karakterlerin başında hücre büyüklüğü, hücre şekli, nüklear organizasyon, somatik ve oral siliyatür gibi karakterler gelmektedir (Foissner & Xu, 2007).

Sunulan bu çalışmada Petri kültürlerinde birbiri ardınca gözlenen morfolojik olarak birbirinden bariz şekilde ayırt edilebilen üç spathidiid popülasyonu görüldü. Bu popülasyonlardan elde edilen morfometrik veriler üzerinde gerçekleştirilen tek yönlü varyans analizleri sonucunda hücre büyüklüğü, hücre genişliği, nüklear şekil büyüklüğü, somatik kineti sayısı, dorsal fırça uzunluklarının her üç popülasyonun da anlamlı olarak birbirinden farklı oldukları görüldü ( $P < 0.001$ ). Her üç morfolojik popülasyonun 18S rDNA gen bölgesi karşılaştırıldığında kültürlerde birbiri ardınca gözlenen ve farklı morfoloji sergileyen popülasyonların benzer nükleotid dizisine sahip olmalarından dolayı bu siliyatların aynı popülasyonun farklı gelişim formları olduğu sonucuna varıldı. Fakat elde edilen popülasyonlar, morfolojik olarak daha önce tanımlanmış türlere (Foissner & Lei, 2004; Xu & Foissner, 2005; Foissner & Xu, 2007; Foissner ve ark., 2014; Jang ve ark., 2017) dahil edilemediğinden *Spathidium* sp. olarak bildirildi.

Bu çalışmada izole edilen *Spathidium* sp. popülasyonunun 18S rDNA gen dizilerinin diğer *Spathidium* türlerinden ziyade *Lagnophrya acuminata* (JQ723972), *Enchelys gasterosterus* (JF263447) ve *Balantidion pellucidum* (JF263444) türleri ile yakın ilişkili olması dikkat çekicidir. Bu siliyatlar (*Lagnophrya acuminata*, *Enchelys gasterosterus* ve *Balantidion pellucidum*) morfolojik

olarak *Spathidium* türlerinden çok farklı oldukları gibi taksonomik olarak da birbirinden uzak ve her biri ayrı familyalar içinde sınıflandırılmaktadır (*Lagnophrya acuminata*, Familya Trachelophyllidae Kent 1882; *Enchelys gasterosterus*, Familya Enchelyidae Ehrenberg, 1838; *Balantidion pellucidum*, Acrpoisthiidae Foissner and Foissner 1988). *Lagnophrya acuminata* (Şekil 8d, 8e) 70-95 × 20-30 µm boyutları, vazo biçimli, geri çekilebilir 10 µm yüksekliğinde oral çıkıntı, hücrenin ortasında konumlanmış elipsoid tek makronükleus ve birkaç mikronükleus, dikinetid sirkamoral kineti, 11-18 µm ve 3-4 µm uzunluğunda iki tip ekstuzoma sahip olması ile karakterize edilir. *Lagnophrya acuminata* morfolojik ve morfometrik olarak *Spathidium* sp.'den oldukça farklıdır. *Enchelys gasterosterus* (Şekil 8c) vazo biçimli, apikal konumlu oral açıklık düz olarak kesik, hücrenin ortasında konumlanmış oval biçimli bir makronükleus ve küresel biçimli bir mikronükleus, sirkamoral kineti somatik kinetilerin anteriyöründe ve uzun eksene paralel düzenlenmiş olması ile karakterize edilir ve bu çalışmanın konusunu oluşturan *Spathidium* sp.'den morfolojik olarak farklıdır. *Balantidion pellucidum* (Şekil 8a, 8b) 70-100 × 25-45 µm boyutları, genişçe silindirik ve anteriyör kısım hafifçe daralmış biçimli, oral açıklık anteriyörde ve düz olarak kesik, oral açıklığın etrafı somatik sillerin anteriyör ucunun farklılaşmasından oluşan fragmentli sirkamoral kineti, hücrenin ortasında konumlanmış küresel veya hafifçe eliptik bir makronükleus ve küresel biçimli tek mikronükleus, 4-6 µm uzunluğunda çubuk biçimli ekstruzomlar ile karakterize edilir. Bu siliyatlar morfolojik ve morfometrik olarak bu çalışmanın konusunu oluşturan *Spathidium* sp.'den farklıdır.

Moleküler verilere dayalı filogenetik analizler Spathidiida takımı içerisinde yer alan taksonların monofiletik olmadıkları pek çok çalışmada gösterilmiştir (Vd'acný ve ark., 2014; Jang ve ark., 2015 ve 2017; Rajter & Vd'acný, 2016; Yıldız, 2018). Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar Spahidiida takımının dış grup olarak kullanılan Pleurostomatida takımından tam destek ile (ML=100; BI=1.00) ayrılarak monofiletik bir grup oluşturduğu, Spathidiida takımı içerisinde yer alan taksonların ise önceki çalışmalarda olduğu gibi parafiletik oldukları görülmüştür.



Şekil 8. Filogenetik ağaçta *Spathidium* sp. ile birlikte kümelenen siliyatların morfolojisi. a, b: *Balantidion* sp. (Foissner ve ark., 1999) c: *Enchelys* sp. (Curds, 1983); d, e: *Lagnophrya acuminata* (Foissner ve ark., 1999).

Filogenetik ağaçlarda spathidiid siliyatlar 5 ana klad (K1-K5) oluşturdukları ve *Spathidium* cinsi üyelerinin bu kladların tamamında diğer siliyatlar ile birlikte kümelenen üyelerinin bulunduğu ve polifiletik oldukları açıkça görülmektedir (Şekil 7). Bu kaotik durum iki sebepten kaynaklanabilir; 1) siliyat taksonları homolojiyi yansıttığı varsayılan morfolojik veriler kullanılarak oluşturulmuştur. Spathidiid siliyatların taksonomisinde başta oral apareyin morfolojisi ve oral siliyatür olmak üzere hücre şekli, somatik siliyatür, hücre biçimi ve büyüklüğü, ekstruzom şekli yaygın olarak kullanılan morfolojik karakterlerdir (Xu & Foissner, 2005; Foissner & Xu, 2007; Foissner ve ark., 2014; Jang ve ark., 2017). Spathidiid siliyatlar avcı organizmalar olup kendilerinden küçük, eşit ya da daha büyük siliyatlar ve diğer küçük çok hücreli organizmaları yakalayarak beslenirler. Farklı soy hatlarından gelen ve benzer beslenme stratejisi altında aynı seçim baskısına maruz kaldıkları için benzer morfoloji gösterebilirler. Bu da morfolojik yapıya dayalı taksonominin bu organizma grubu için (Takım: Spathidiida) homolojiyi yansıtmadığı düşünülebilir. Bu varsayımın doğruluğunu test etmek için filogenetik ağaçta birlikte kümelenen organizmalar için ayırt edici yeni morfolojik karakterlerin ortaya çıkartılması, bu karakterlerin filogenetik yöntemler ile diğer spathidiid siliyatlara uyarlanması

gerekmektedir; 2) siliyatların 18S rDNA gen bölgesinin farklı habitatlarda birbirinden farklı mutasyonlar geçirdiği ve konvergansinin olduğudur. Spathidiidlerde daha da genel anlamda avcı siliyatları temsil edilen Haptoria sınıfında konvergansinin veya paralel evrim olabileceğine dair veriler mevcuttur (Vd'acný ve ark., 2014; Jang ve ark., 2017). Bu durumu açıklığa kavuşturmak için 18S rDNA gen bölgesine ilave olarak başka gen bölgelerinin de dahil edildiği (ITS, COI gibi) filogenetik ağaçlar oluşturularak 18S rDNA gen bölgelerinin filogenetik bilgiyi açığa çıkarma durumları test edilmelidir. Siliyatlar ile ilgili moleküler verilerin oldukça az ve belli organizmalar ile sınırlı olmasından dolayı mevcut veriler ile bu karşılaştırmaları yapmak şu an için mümkün görülmemektedir. Bu karışıklığın çözümü ancak farklı habitatlardan izole edilecek güvenilir morfolojik verilere dayalı farklı gen bölgelerine ait verilerin kullanılacağı filogenetik çalışmalar ile mümkün olacaktır.

### Teşekkür

Bu çalışmaya FYL-2019-7960 numaralı tez projesi kapsamında maddi destek veren Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

### Kaynakça

- Adl, S. M., Simpson, A. G. B., Farmer, M. A., Andersen, R. A., Anderson, O. R., Barta, J. R., ... , & Taylor, M. F. J. R. (2005). The new higher level classification of eukaryotes with emphasis on the taxonomy of protists. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 52(5), 399 - 451. doi:10.1111/j.1550-7408.2005.00053.x
- Ayres, D. L., Darling, A., Zwickl, D. J., Beerli, P., Holder, M. T., Lewis, P. O., ... , & Suchard, M. A. (2012). BEAGLE: An application programming interface and high-performance computing library for statistical phylogenetics. *Systematic Biology*, 61, 170–173. doi:10.1093/sysbio/syr100
- Corliss, J. O. (2001). Protozoan Taxonomy and Systematics. In G. Pettis (Ed.), *Encyclopedia of Life Sciences* (pp. 1-7). John Wiley & Sons. doi:10.1038/npg.els.0001925
- Curds, C. R. (1983). *British and Other Freshwater Ciliated Protozoa*. U.S.A: Cambridge University Press.
- Darriba, D., Taboada, G. L., Doallo, R. & Posada, D. (2012). jModelTest 2: more models, new heuristics and parallel computing. *Nature Methods*, 9, 772. doi:10.1038/nmeth.2109
- Foissner, W. (1991). Basic light and scanning electron microscopic methods for taxonomic studies of ciliated protozoa. *European Journal of Protistology*, 27(4), 313 - 330. doi:10.1016/S0932-4739(11)80248-8
- Foissner, W. (2014). An update of 'basic light and scanning electron microscopic methods for taxonomic studies of ciliated protozoa'. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 64, 271 - 292. doi:10.1099/ijs.0.057893-0
- Foissner, W., Berger, H. & Schaumburg, J. (1999). *Identification and Ecology of Limnetic Plankton Ciliates*. München, Germany: Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft.
- Foissner, W., & Lei, Y. L. (2004). Morphology and ontogenesis of some soil spathidiids (Ciliophora, Haptoria). *Linzer biologische Beiträge*, 36, 159–199.
- Foissner, W., & Xu, K. (2007). Monograph of the Spathidiida (Ciliophora, Haptoria) Vol. I: Protospathidiidae, Arcuospathidiidae, Apertospathulidae. *Monographiae Biologicae*, 81, 1–485.
- Foissner, W., Wolf, K. W., Kumar, S., Xu, K. D., & Quintela-Alonso, P. (2014). Five new spathidiids (Ciliophora: Haptoria) from Caribbean Tank Bromeliads. *Acta Protozoologica*, 53(2), 159 - 194. doi:10.4467/16890027AP.14.015.1596
- Gong, J., Kim, S. J., Kim, S. Y., Min, G. S., Roberts, D. M., Warren, A., & Choi, J. K. (2007). Taxonomic redescrptions of two ciliates, *Protogastrostyla pulchra* n. g., n. comb. and *Hemigastrostyla enigmatica* (Ciliophora: Spirotrichea, Stichotrichia), with phylogenetic analyses based on 18S and 28S rRNA gene sequences. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 54(6), 468 - 478. doi:10.1111/j.1550-7408.2007.00288.x



- Hoang, D. T., Chernomor, O., von Haeseler, A., Minh, B. Q., & Vinh, L. S. (2018). UFBoot2: Improving the ultrafast bootstrap approximation. *Molecular Biology and Evolution*, 35(2), 518 - 522. doi:10.1093/molbev/msx281
- Jang, S. W., Vd'acný, P., Shazib, S. U. A., & Shin, M. K. (2015). Morphology, ciliary pattern and molecular phylogeny of *Trachelophyllum brachypharynx* Levander, 1894 (Litostomatea, Haptoria, Spathidiida). *Acta Protozoologica*, 54(2), 123 - 135. doi:10.4467/16890027AP.15.010.2735
- Jang, S. W., Vd'acný, P., Shazib, S. U. A., & Shin, M. K. (2017). Linking morphology and molecules: integrative taxonomy of spathidiids (Protista: Ciliophora: Litostomatea) from Korea. *Journal of Natural History*, 51(17-18), 939 - 974. doi:10.1080/00222933.2017.1319520
- Kumar, S., Stecher, G., & Tamura, K. (2016). MEGA7: Molecular evolutionary genetics analysis version 7.0 for bigger datasets. *Molecular Biology and Evolution*, 33(7), 1870 - 1874. doi:10.1093/molbev/msw054
- Lynn, D. H. & Small, E. B. (2000). Phylum Ciliophora Doflein, 1901. In J. J. Lee, G. F. Leedale, P. Bradbury (Eds.), *The Illustrated Guide to the Protozoa* (pp. 371-656). Lawrence, Kansas, USA: Society of Protozoologists.
- Nguyen, L. T., Schmidt, H. A., von Haeseler, A., & Minh, B. Q. (2015). IQ-TREE: A fast and effective stochastic algorithm for estimating maximum-likelihood phylogenies. *Molecular Biology and Evolution*, 32(1), 268 - 274. doi:10.1093/molbev/msu300
- Özdamar, K. (1999a). *Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi 1*. Eskişehir: Kaan Kitabevi.
- Özdamar, K. (1999b). *Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi 2*. Eskişehir: Kaan Kitabevi.
- Posada, D. (2008). jModelTest: Phylogenetic model averaging. *Molecular Biology and Evolution*, 25(7), 1253 - 1256. doi:10.1093/molbev/msn083
- Rajter, L., & Vd'acný, P. (2016). Rapid radiation, gradual extinction and parallel evolution challenge generic classification of spathidiid ciliates (Protista, Ciliophora). *Zoologica Scripta*, 45(2), 200 - 223. doi:10.1111/zsc.12143
- Ronquist, F., Teslenko, M., van der Mark, P., Ayres, D. L., Darling, A., Höhna, S., ... , & Huelsenbeck, J. P. (2012). MrBayes 3.2: Efficient Bayesian phylogenetic inference and model choice across a large model space. *Systematic Biology*, 61(3), 539 - 542. doi:10.1093/sysbio/sys029
- Shazib, S. U. A., Vd'acný, P., Kim, J. H., Jang, S. W., & Shin, M. K. (2016). Molecular phylogeny and species delimitation within the ciliate genus *Spirostomum* (Ciliophora, Postciliodesmatophora, Heterotrichea), using the internal transcribed spacer region. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 102, 128 - 144. doi:10.1016/j.ympev.2016.05.041
- Talavera, G., & Castresana, J. (2007). Improvement of phylogenies after removing divergent and ambiguously aligned blocks from protein sequence alignments. *Systematic Biology*, 56(4), 564 - 577. doi:10.1080/10635150701472164
- Tamura, K., Stecher, G., Peterson, D., Filipowski, A., & Kumar, S. (2013). MEGA6: Molecular evolutionary genetics analysis version 6.0. *Molecular Biology and Evolution*, 30(12), 2725 - 2729. doi:10.1093/molbev/mst197
- Vd'acný, P., Bourland, W. A., Orsi, W., Epstein, S. S., & Foissner, W. (2011). Phylogeny and classification of the Litostomatea (Protista, Ciliophora), with emphasis on free-living taxa and the 18S rRNA gene. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59(2), 510 - 522. doi:10.1016/j.ympev.2011.02.016
- Vd'acný, P., & Foissner, W. (2012). Monograph of the Dileptids (Protista, Ciliophora, Rhynchostomatia). *Denisia*, 31, 1-529.
- Vd'acný, P., & Foissner, W. (2013). Synergistic effects of combining morphological and molecular data in resolving the phylogenetic position of *Semispathidium* (Ciliophora, Haptoria) with description of *Semispathidium breviararmatum* sp. n. from tropical Africa. *Zoologica Scripta*, 42(5), 529 - 549. doi:10.1111/zsc.12023
- Vd'acný, P., Breiner, H. W., Yashchenko, V., Dunthorn, M., Stoeck, T., & Foissner, W. (2014). The chaos prevails: molecular phylogeny of the Haptoria (Ciliophora, Litostomatea). *Protist*, 165(1), 93 - 111. doi:10.1016/j.protis.2013.11.001

- Xu, K., & Foissner, W. (2005). Morphology, ontogenesis and encystment of a soil ciliate (Ciliophora, Haptorida), *Arcuospathidium cultriforme* (Penard, 1922), with models for the formation of the oral bulge, the ciliary patterns, and the evolution of the spathidiids. *Protistology*, 4, 5 - 55.
- Yıldız, İ. (2018). Morphology and phylogeny of *Apertospathula oktemae* n. sp. (Ciliophora, Haptoria, Spathidiida) from Lake Van, Turkey. *European Journal of Protistology*, 66, 1 - 8. [doi:10.1016/j.ejop.2018.06.001](https://doi.org/10.1016/j.ejop.2018.06.001)
- Yıldız, İ. (2021). Morphology and phylogeny of a new soil ciliate, *Colpodidium zelihayildizae* n. sp. (Ciliophora, Nassophorea, Colpodidiidae), from Van, Turkey. *Turkish Journal of Zoology*, 45, 304 - 313. [doi:10.3906/zoo-2101-20](https://doi.org/10.3906/zoo-2101-20)



Research Article

**Antimicrobial, Antibiofilm and Antiurease Activities of Microbially Synthesized Silver Nanoparticles against *Proteus mirabilis***

**Sumeyra GURKOK\*, Murat OZDAL**

Ataturk University, Science Faculty, Biology Department 25240, Erzurum, Türkiye  
Sumeyra GURKOK, [ORCID No: 0000-0002-2707-4371](https://orcid.org/0000-0002-2707-4371), Murat OZDAL, [ORCID No: 0000-0001-8800-1128](https://orcid.org/0000-0001-8800-1128)  
\*Corresponding author e-mail: sumeyrag@gmail.com

**Article Info**

Received: 26.10.2022  
Accepted: 15.03.2023  
Online August 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1194875](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1194875)

**Keywords**

Antibiofilm,  
Antimicrobial,  
Antiurease,  
Nanoparticles,  
*P. aeruginosa*  
*Proteus mirabilis*,  
Silver

**Abstract:** Nanoparticles (NPs) are tiny materials ranging in size from 1 to 100 nm and have unique magnetic, electrical, and optical characteristics differing from bulk materials. They have a broad spectrum of applications in different industries. Several physical and chemical techniques have been applied to produce metal NPs. Alternatively, green synthesis offers an environmentally friendly and simple means for NP preparation. In the present study, silver NPs were produced by the *Pseudomonas aeruginosa* OG1 strain. Characterization of NPs was performed by TEM, SEM, and XRD. These NPs were used against pathogenic *Proteus mirabilis*, which shows high-level urease activity and forms clear biofilms. Silver NPs obtained in the present study were applied to inhibit the growth, urease production, and biofilm formation of *P. mirabilis*. Growth inhibition zones of 9 mm and 11 mm and, 60 % and 85% antibiofilm effects were obtained by 100 µg mL<sup>-1</sup> and 200 µg mL<sup>-1</sup> NPs, respectively. The urease activity of *P. mirabilis* was completely inhibited in both concentrations. These results show that AgNPs can be used as effective antimicrobial, antibiofilm, and antiurease agents in the fight against pathogens.

**Mikrobiyal Olarak Sentezlenen Gümüş Nanopartiküllerin *Proteus mirabilis*'e Karşı Antimikrobiyal, Antibiyofilm ve Antiürez Aktiviteleri**

**Makale Bilgileri**

Geliş: 26.10.2022  
Kabul: 15.03.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1194875](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1194875)

**Anahtar Kelimeler**

Antibiyofilm,  
Antimikrobiyal,  
Antiürez,  
Gümüş,  
Nanopartiküller,  
*P. aeruginosa*  
*Proteus mirabilis*

**Öz:** Nanopartiküller (NP), 1 ila 100 nm arasında değişen küçük malzemelerdir ve bulk malzemelerden farklı benzersiz manyetik, elektriksel, optik özelliklere sahiptir. Farklı endüstrilerde geniş bir uygulama alanlarına sahiptirler. Metal NP'leri üretmek için çeşitli fiziksel ve kimyasal teknikler uygulanmıştır. Alternatif olarak, yeşil sentez, NP hazırlama için çevre dostu ve basit bir yol sunar. Bu çalışmada, gümüş NP'ler *Pseudomonas aeruginosa* OG1 suşu tarafından üretilmiştir. NP'lerin karakterizasyonu TEM, SEM ve XRD ile yapılmıştır. Bu NP'ler, yüksek düzeyde ürez aktivitesi gösteren ve berrak biyofilmler oluşturan patojenik *Proteus mirabilis*'e karşı kullanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen gümüş NP'ler *P. mirabilis*'in büyümesini, ürez üretimini ve biyofilm oluşumunu engellemek için uygulanmıştır. Sırasıyla 100 µg mL<sup>-1</sup> ve 200 µg mL<sup>-1</sup> konsantrasyonlardaki NP'lerle 9 mm ve 11 mm'lik büyüme inhibisyon bölgeleri ve %60 ve %85 antibiyofilm etkileri elde edildi. *P. mirabilis*'in ürez aktivitesi her iki konsantrasyonda da tamamen inhibe edilmiştir. Bu sonuçlar, AgNP'lerin patojenlerle mücadelede etkili antimikrobiyal, antibiyofilm ve antiürez ajanları olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.

## 1. Introduction

Nanotechnology has advanced rapidly in recent years as a result of the numerous applications of nanoparticles (NPs) in disciplines such as optics, electronics, energy, food, agriculture, biology, engineering, environment, textile, cosmetics, medicine, pharmacy, and biomedicine (Kapoor et al., 2021; Ozdal & Gurkok, 2022a). NPs are very small materials that range in size from 1 to 100 nanometers. Most NPs are made up of just a few hundred atoms. NPs differ greatly from bulk materials in that when size lowers, the surface area-to-volume ratio grows significantly, resulting in NPs with numerous new and unique properties (Alavi & Varma, 2021).

NPs can arise naturally or be man-made through physical, chemical, and biological means. The first two processes have drawbacks such as the use of hazardous and poisonous chemicals, low efficiency, and excessive energy consumption at high temperatures (Ahmad et al., 2019; Ozdal & Gurkok, 2022b). Given the aforementioned disadvantages, research has concentrated on the synthesis of NPs employing low-cost, biocompatible, non-toxic, and environmentally friendly biological components (Koul et al., 2021). Another advantage of this green synthesis approach is that it is usually performed at ambient temperature or with mild heating. As a result, the use of NPs generated using physicochemical methods in biomedical applications has been limited, owing to concerns about toxicity and bioincompatibility (Shah et al., 2015).

Today, microorganisms are commonly used in the biosynthesis of NPs because it is a simple, cost-effective, and ecologically benign technique. This method is also promising for large-scale NP generation (Khandel & Shahi, 2018). Microorganisms are important nano-factories because their various reductase enzymes may decrease, accumulate, and detoxify heavy metals (Singh et al., 2016). Enzymes, proteins, polysaccharides, biosurfactants, pigments, and other biological compounds are present in microorganisms and play a vital role in the production of NPs (Ozdal & Gurkok, 2022a).

Because of their biocompatibility, they have numerous potential applications in the sector of medicine. In this context, NPs are used to combat potentially harmful pathogens. *Proteus mirabilis* is a Gram-negative bacterium that causes urinary tract infections mostly through biofilm development (Wasfi et al., 2020). Biofilm generation and antibiotic resistance are rapidly becoming major global issues in the public health system (Ozdal & Gurkok, 2022b). As a result, in recent years, the effects of various NPs such as Ag, ZnO (Khan et al., 2021), ZnO, CuO (Mohamed et al., 2021), and Se (Salem et al., 2022) on biofilm formation and microbial growth have been studied. Bacterial ureases are recognized as key virulence factors in human health such as kidney stone formation, catheter occlusion, stomach inflammation, peptic ulcers, and dental plaque creation (Loharch & Berlicki, 2022). Urease is also necessary for the biofilm consortium to remain stable (Morou-Bermudez et al., 2015). NPs with the ability to inhibit urease include Ag, Au (Ali et al., 2021), and ZnO (Sajjad et al., 2021; Ashraf et al., 2023). Considering this information, the biofilm and urease of *P. mirabilis* may be promising therapeutic targets for bacterial control. As a result, the antibacterial, antibiofilm, and antiurease activities of biosynthesized AgNPs against *P. mirabilis* were studied in this study.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Microorganisms

*Pseudomonas aeruginosa* OG1 (NCBI KC453990) isolated in a previous study (Ozdal et al., 2016) was used for the microbial synthesis of AgNPs. *Proteus mirabilis* (ATCC 12453) was used to investigate the biological activities of the synthesized AgNPs.

### 2.2. Biosynthesis of silver nanoparticles

For the synthesis of AgNPs, the *P. aeruginosa* OG1 strain was incubated in Nutrient Broth (NB) for 24 hours at 30 °C and 150 rpm. The cell suspension (500 µL, OD<sub>600</sub> 1) was inoculated into 100 mL of Luria Bertani Broth (LB) containing 1 mM AgNO<sub>3</sub>. NP biosynthesis was carried out at 30 °C, 150 rpm for 48 hours. To purify AgNPs at the end of the period, the cell suspensions were sonicated in an ultrasonic bath (Apple/S30) at 100 W for 10 minutes and washed using hexane, ethanol, and ddH<sub>2</sub>O,

respectively. Each step was centrifuged at 10 000 g for 10 minutes. Control experiments without AgNO<sub>3</sub> were performed simultaneously.

### 2.3. Characterization of silver nanoparticles

A UV-visible spectrophotometer (Shimadzu, Japan), TEM (HT-7700), X-ray diffractometer (XRD Bruker D2, K, =1.54 Å, scanning angle 70°), and SEM (Zeiss Sigma 300) were used to characterize AgNPs (Çakıcı et al., 2019).

### 2.4. Investigation of the antimicrobial effect of silver nanoparticles

The antibacterial activity of AgNPs against *P. mirabilis* bacteria was tested using the agar disc diffusion method (Bauer et al., 1966). Bacterial culture was cultivated in NB for 24 hours at 37 °C and 160 rpm. Bacterial dilutions of 0.5 McFarland standard (1.5 x 10<sup>8</sup> cfu mL<sup>-1</sup>) were prepared, and aliquots of 100 µL were dispersed on Nutrient Agar (NA) plates. On these plates, paper discs containing 100 µg and 200 µg AgNPs were inserted. Negative control disc containing 25 µL sterile ddH<sub>2</sub>O and positive control disc containing 25 µg gentamicin were placed on these plates. After 24 hours of incubation at 37 °C, antimicrobial activity was assessed by measuring inhibition zones around AgNPs-impregnated discs.

### 2.5. Investigation of antibiofilm effect of silver nanoparticles

A biofilm inhibition assay with AgNPs was tested against *P. mirabilis* in 96-well culture plates. The bacteria were incubated in 10 mL Tryptic Soy Broth (TSB) with 1% glucose for 24 hours at 37 °C. After 24-hour incubation, 177.5 µL of the growth medium, 12.5 µL of AgNPs (final concentrations of 100 µg mL<sup>-1</sup> and 200 µg mL<sup>-1</sup>), and 10 µL of test bacteria dilutions were mixed into each well of the plates. In the positive controls, 10 µL of bacterial dilutions were mixed with 190 µL of the growth medium, while the negative control contained growth medium only. In antibiotic control, 12.5 µL of gentamicin (final concentration of 25 µg) was added instead of AgNPs. After incubation at 37 °C for 24 hours, unattached cells were removed by washing three times with distilled water and adherent cells were stained with 200 µL of 0.4% crystal violet for 30 minutes. Later, the excess crystal violet was removed and the wells were washed with distilled water three times. The residual stained biofilm was suspended in 200 µL of 70% ethanol at room temperature for 30 minutes. The OD of the wells was measured using a microplate reader at 570 nm (Thermo Scientific Inc., Multiskan GO, Finland) (Bai et al., 2019). Biofilm inhibition in the wells containing AgNPs (test group) was compared with the control group and calculated with the formula 1:

$$\text{Biofilm inhibition (\%)} = [(\text{Control OD}_{570\text{nm}} - \text{Test OD}_{570\text{nm}}) / \text{Control OD}_{570\text{nm}}] \times 100 \quad (1)$$

### 2.6. Investigation of the antiurease effect of silver nanoparticles

Urease activity was determined using the Nesslerization method with spectrophotometric analysis at 425 nm (Doriya & Kumar, 2016). Urease assay was performed in test tubes containing 3.8 mL of NB and 200 µL of urea solution (0.6 M urea prepared in Tris Buffer, pH 7). AgNPs (final concentrations of 100 µg and 200 µg) and 30 µL of test bacterial suspension of *P. mirabilis* were added. Positive control tubes were prepared in the same way without the addition of test NPs. Negative controls contained only NB and urea in the same proportions. In antibiotic control, gentamicin (final concentration of 25 µg) was added instead of AgNPs. All tubes were incubated at 37 °C, 150 rpm for 24 hours. The tubes were then centrifuged at 6 000 rpm. The supernatant (100 µL) was mixed with 900 µL of urea solution and left at 30 °C for 15 minutes. The urease reaction was stopped with 100 µL of 10% Trichloroacetic acid (TCA) and centrifuged at 6 000 rpm. To analyze the released ammonia, 200 µL of the supernatant was mixed with 200 µL of Nessler's Reagent and 1.6 mL of ddH<sub>2</sub>O and incubated for 5 minutes at room temperature. The absorbances of the mixtures were measured at 425 nm. Urease inhibition rates were calculated by the formula 2:

$$\text{Urease inhibition (\%)} = [(\text{Control OD}_{425\text{nm}} - \text{Test OD}_{425\text{nm}}) / \text{Control OD}_{425\text{nm}}] \times 100 \quad (2)$$



### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Characterization of silver nanoparticles

The reduction of the ions in  $\text{AgNO}_3$  in the *P. aeruginosa* OG1 culture to AgNPs was observed with the change of the color of the culture medium from yellow to brown, as vibrations occurred on the plasma surface. As is known, the formation of silver nanoparticles is understood by the color of the medium turning dark brown or black (Sharifi-Rad et al., 2021; Ozdal & Gurkok, 2022b).

Microorganisms have been used frequently in the biosynthesis of NPs in recent years and *Pseudomonas* species is one of the most preferred microorganisms in this regard and have been used in biosynthesis of various particles such as AgNPs (John et al., 2020; Yang et al., 2020; Pernas-Pleite et al., 2022), AuNPs (Husseiny et al., 2007) and ZnO-NPs (Abdo et al., 2021).

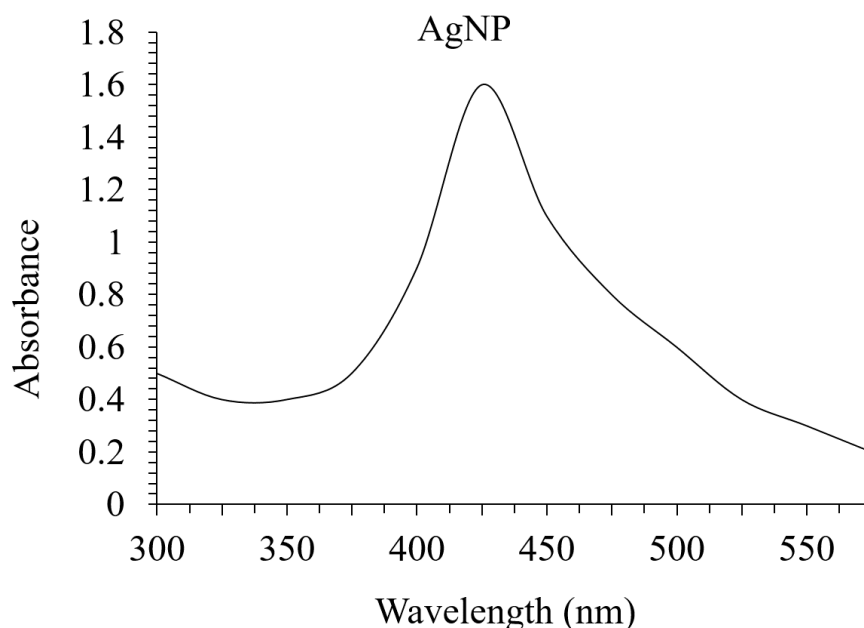


Figure 1. UV-Vis absorbance peak of microbially synthesized AgNPs.

The UV-visible spectrum of the synthesized AgNPs was determined by a spectrophotometer (Figure 1). It was observed that AgNPs peaked at 415 nm in the spectrum taken by UV-visible spectrophotometer in the wavelength range of 350-600 nm. Similar to the results of this study, many studies have indicated the formation and presence of spherical and/or near-spherical AgNPs, with the SPR peak between 410 and 460 nm (Chandrakar et al., 2021; Sharifi-Rad et al., 2021; Hu et al., 2022).

The images of AgNPs taken with TEM (60.0 K X magnification) at 100 nm (Figure 2.a) and with SEM (50.00 K X magnification) at 200 nm (Figure 2.b) scale are shown in Figure 2. AgNPs were found to have a size less than 30 nm. The energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analysis was used to evaluate the composition of synthesized AgNPs, as shown in Figure 2c. The EDX spectrum showed mostly Ag, carbon (C) and oxygen (O) components forming the structure of the AgNPs sample.



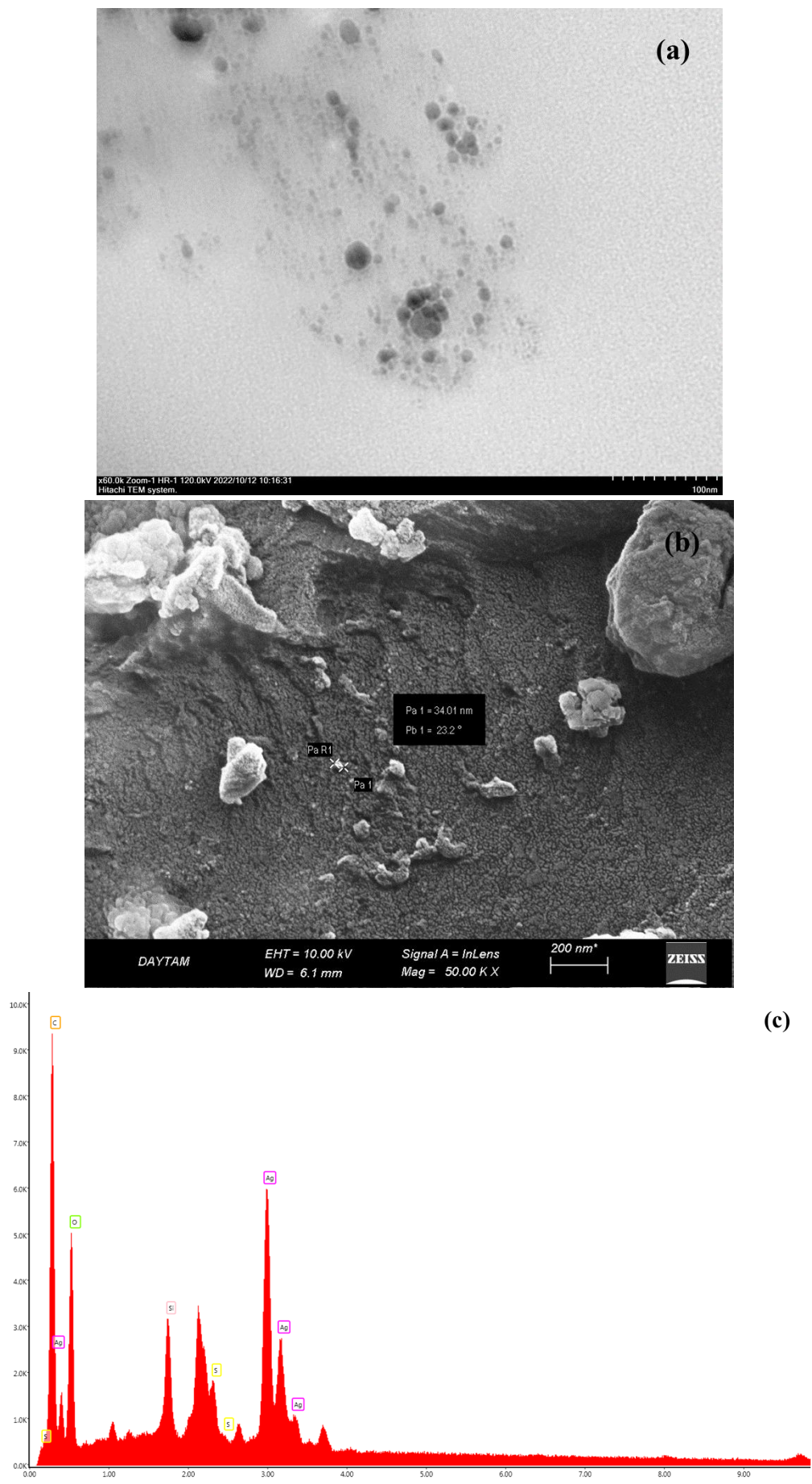


Figure 2. TEM (a), SEM (b) images, and corresponding EDX spectrum (c) of AgNPs.

Figure 3 depicts the crystal structure of produced AgNPs as determined by XRD analysis. The distinctive spherical crystal structure of silver at  $2\theta$  was shown by four intense peaks at 38.2, 46.1, 64.1, and 77.3. These peaks indicate that a spherical nanosilver was synthesized (Elbahnasawy et al., 2021; Abdulkareem et al., 2022).

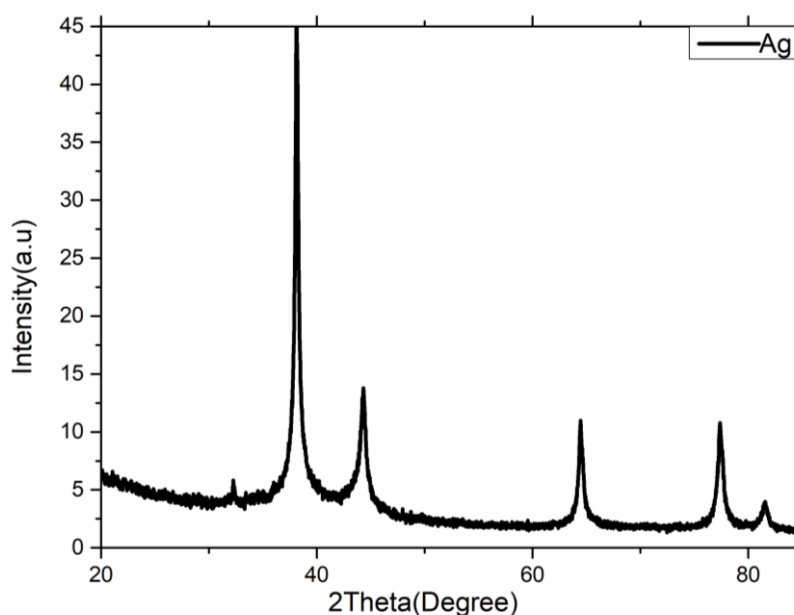


Figure 3. XRD pattern of AgNPs.

### 3.2. Antibacterial, antibiofilm and antiurease effects of silver nanoparticles

Nanoparticles are known to have a wide range of biological activities such as antimicrobial, antibiofilm, and antiurease effects which vary considerably depending on the type, shape, and size, the synthesis method, and the concentration of the nanoparticles, the exposure time and the nature of pathogenic microorganisms.

The antibacterial, antibiofilm, and antiurease characteristics of AgNPs are summarized in Table 1. After 24-hour incubation on NA with paper discs soaked with  $100 \mu\text{g disc}^{-1}$  and  $200 \mu\text{g disc}^{-1}$  AgNP, *Proteus mirabilis* showed growth inhibition zones of 9 and 11 mm, respectively, while the positive control gentamicin disks resulted in 15 mm growth inhibition zone and negative control disk containing ddH<sub>2</sub>O showed no zone. As mentioned before, the biological effects of nanoparticles such as the observed antimicrobial effect vary depending on many parameters. Obtaining close antimicrobial results with the positive control using a pure antibiotic with nanoparticles indicates a promising result.

Antimicrobial effects of AgNPs against a range of microorganisms have been demonstrated (Lashin et al., 2021; Chandrasekharan et al., 2022). Ag-NP synthesized by *Streptomyces roseolus* was used in the range of  $0.39\text{--}25 \text{ mg mL}^{-1}$  (which is quite higher than the current study) against Gram-positive *L. monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *B. subtilis*, *B. cereus*, Gram-negative bacteria *E. coli* O157:H7, *K. pneumonia*, *A. hydrophilia*, and yeast *C. albicans*. They observed higher antibacterial effect against *E. coli* O157:H7 (23.66 mm inhibition zone) and lower antimicrobial activity against *C. albicans* ( $18.66 \pm 0.3$  mm inhibition zone) and *B. subtilis* ( $19.66 \pm 0.3$  mm inhibition zone) (Elnady et al., 2022). The antibacterial activity of AgNPs synthesized by tea leaves extract was evaluated against Gram-negative foodborne pathogens, *E. coli* ATCC 25922, *K. pneumoniae* ATCC 13773, *S. typhimurium* ATCC 14028, and *S. enteritidis* ATCC 13076, and 15 mm, 10 mm, 20 mm, and 20 mm clear zones were obtained (Loo et al., 2018). Antimicrobial effect of AgNPs synthesized by photo-irradiation was evaluated against *S. warneri* and 14 mm zone of inhibition was obtained (Dong, et al., 2017). In another study, antibacterial activity of AgNPs synthesized by *P. aeruginosa* against multidrug-resistant isolates from intensive care unit has been reported (Abeer Mohammed et al., 2022). The antimicrobial activity of these AgNPs was used against *A. baumannii* and 18 mm inhibition zone was obtained using 1 and 4 mM AgNPs. The same nanoparticle was also used against *K. pneumoniae*

and 19.17 mm inhibition zone was observed at a concentration of 1 mM of AgNPs and 22 mm using 4 mM of AgNPs (Abeer Mohammed et al., 2022). The antimicrobial effects of AgNPs synthesized by *Lactobacillus acidophilus* (Hussein & Alsharifi, 2021) and leaves extracts of *Ficus benghalensis* (Maniraj et al., 2019) against *P. mirabilis* have been studied previously, but, to the best of our knowledge, antimicrobial effects of AgNPs synthesized by *P. aeruginosa* against *P. mirabilis* was investigated for the first time in this study.

In the presence of 100 and 200 mg mL<sup>-1</sup> AgNPs, biofilm production was reduced by 60% and 85%, respectively. (When gentamicin (25 µg) was added to the cultures, biofilm formation was not observed because bacteria did not grow). Mohanta et al. (2020) reported that photosynthesized AgNPs have considerable anti-biofilm efficacy against human pathogens *E. coli*, *P. aeruginosa*, and *S. aureus*. According to the researchers, AgNPs' anti-biofilm effect was linked to the reduction of bacterial exopolysaccharide (EPS) production, which is required for biofilm formation (Seo et al., 2021). Bharathi et al. (2018) found dose-dependent biofilm inhibitory action of AgNPs against *S. aureus* and *E. coli* at concentrations ranging from 25 to 100 µg mL<sup>-1</sup>. At a concentration of 100 µg mL<sup>-1</sup>, the biosynthesized AgNPs inhibited *S. aureus* and *E. coli* biofilm formation by 90%.

Antibiofilm properties of AgNPs synthesized by *Pseudomonas alloputida* have been reported against *Bacillus subtilis*, *E. coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *P. aeruginosa*, *S. aureus*, and *S. epidermidis* pathogens (Pernas-Pleite et al., 2022). This result showed that infections due to biofilms can be prevented and treated with AgNPs. Commercial AgNPs have also been evaluated for their antibiofilm activities and resulted in 50% biofilm inhibition at concentrations about 50 ppm for *E. coli* and slightly higher for *S. aureus* (Lange et al., 2021).

Urease is a virulence factor found in a variety of pathogens that is necessary by the host organism. Urease synthesis in *P. mirabilis* was completely inhibited during incubation with AgNPs at both dosages. (When gentamicin (25 µg) was added to the cultures, urease synthesis was not observed because bacteria did not grow). NPs may interact with the enzyme's active site or allosteric site, creating structural modifications. Because of its non-competitive method of NP binding, urease loses its enzymatic properties (Ponnuvel et al., 2015). Urease inhibition has previously been demonstrated by NPs such as Ag, Au (Ullah et al., 2022), SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, and ZnO (Khan et al., 2017).

Although the antiurease activities of NPs are relatively less studied, it has been reported that AgNP and AuNP synthesized with *Crataegus oxyacantha* extract have antiurease activity and resulted in 99,25 % biofilm inhibition in *Canavalia ensiformis* urease (Ali et al., 2021). ZnONPs synthesized by *Boerhavia diffusa* linn have also been reported to have 81.3% urease inhibition rate (Ashraf et al., 2023). AgNPs from *Fagonia cretica* extracts stabilized by short chain heterocyclic thiol namely Ethyl 6-methyl-4-phenyl-2-thioxo1,2,3,4-dihydropyrim-idine-5-carboxylate (DHPM) was evaluated in a study performed by Khan et al. (2022) and they observed urease inhibition of 40.3%, which is lower than that obtained in this study. However, as far as is known, there is no study on the antiurease activity of AgNPs synthesized with *P. aeruginosa* against *P. mirabilis*.

Antibacterial, antibiofilm, and antiurease activities of AgNPs against *P. mirabilis* were demonstrated for the first time in the current study. Because NPs act on bacteria via several targets/mechanisms, it is extremely difficult for bacteria to develop resistance to them (Lee et al., 2019; Ozdal & Gurkok 2022a). Therefore, NPs are promising agents, as an alternative to antibiotics, against pathogens that develop antibiotic resistance.

Table 1. Antibacterial, antibiofilm, and antiurease activities of AgNPs against *P. mirabilis*

AgNPs Biologic Activities	Gentamicin	AgNP concentrations	
	25 µg	100 µg	200 µg
Antibacterial Activity (inhibition zone)	15 mm	9±0,5 mm	11±0,5 mm
Antibiofilm activity	100%	60±3%	85±4%
Antiurease activity	100%	100%	100%

## 4. Conclusion

In this study, it was determined that biologically synthesized AgNPs have antibacterial, antibiofilm, and antiurease effects against the pathogen *P. mirabilis*. The use of AgNPs can help develop new approaches to prevent biofilm-associated infections and biofilm formation. Due to their diverse activities, AgNPs have the potential to be used in the antimicrobial treatment of pathogenic microorganisms, especially antibiotic-resistant bacteria. Based on this study, green synthesized AgNPs show great promise in the environmental, food, and pharmaceutical industries.

## Acknowledgements

This research was supported by Ataturk University (No grant number).

## References

- Abdo, A. M., Fouda, A., Eid, A. M., Fahmy, N. M., Elsayed, A. M., Khalil, A. M. A., ... & Soliman, A. M. (2021). Green synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) by *Pseudomonas aeruginosa* and their activity against pathogenic microbes and common house mosquito, *Culex pipiens*. *Materials*, 14(22), 6983. doi:10.3390/ma14226983
- Abdulkareem, M. A., Joudi, M. S., & Ali, A. H. (2022). Eco-friendly synthesis of low-cost antibacterial agent (brown attapulgit-Ag nanocomposite) for environmental application. *Chemical Data Collections*, 37, 100814. doi:10.1016/j.cdc.2021.100814
- Abeer Mohammed, A. B., Abd Elhamid, M. M., Khalil, M. K. M., Ali, A. S., & Abbas, R. N. (2022). The potential activity of biosynthesized silver nanoparticles of *Pseudomonas aeruginosa* as an antibacterial agent against multidrug-resistant isolates from intensive care unit and anticancer agent. *Environmental Sciences Europe*, 34(1), 109. doi:10.1186/s12302-022-00684-2
- Ahmad, F., Ashraf, N., Ashraf, T., Zhou, R.-B., & Yin, D.-C. (2019). Biological synthesis of metallic nanoparticles (MNPs) by plants and microbes: their cellular uptake, biocompatibility, and biomedical applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(7), 2913-2935. doi:10.1007/s00253-019-09675-5
- Alavi, M., & Varma, R. S. (2021). Phytosynthesis and modification of metal and metal oxide nanoparticles/nanocomposites for antibacterial and anticancer activities: Recent advances. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 21, 100412. doi:10.1016/j.scp.2021.100412
- Ali, S., Bacha, M., Shah, M. R., Shah, W., Kubra, K., Khan, A., Ahmad, M., Latif, A., Ali, M. (2021). Green synthesis of silver and gold nanoparticles using *Crataegus oxyacantha* extract and their urease inhibitory activities. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 68(5), 992-1002. doi:10.1002/bab.2018
- Ashraf, H., Meer, B., Iqbal, J., Ali, J. S., Andleeb, A., Butt, H., ... & Abbasi, B. H. (2023). Comparative evaluation of chemically and green synthesized zinc oxide nanoparticles: their in vitro antioxidant, antimicrobial, cytotoxic and anticancer potential towards HepG2 cell line. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 13, 243-261. doi:10.1007/s40097-021-00460-3
- Bai, J-R., Zhong, K., Wu, Y-P., Elena, G., & Gao, H. (2019). Antibiofilm activity of shikimic acid against *Staphylococcus aureus*. *Food Control*, 95, 327-333. doi:10.1016/j.foodcont.2018.08.020
- Bauer, A. W., Kirby, W. M., Sherris, J. C., & Turck, M. (1966). Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *Technical Bulletin of the Registry of Medical Technologists*, 36(3), 49-52. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5908210>
- Bharathi, D., Vasantharaj, S., & Bhuvaneshwari, V. (2018). Green synthesis of silver nanoparticles using *Cordia dichotoma* fruit extract and its enhanced antibacterial, anti-biofilm and photo catalytic activity. *Materials Research Express*, 5(5), 055404. doi:10.1088/2053-1591/aac2ef
- Çakıcı, T., Özdal, M., Kundakcı, M., & Kayalı, R. (2019). ZnSe and CuSe NP's by microbial green synthesis method and comparison of I-V characteristics of Au/ZnSe/p-Si/Al and Au/CuSe/p-Si/Al structures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 103, 104610. doi:10.1016/j.mssp.2019.104610
- Chandrakar, V., Tapadia, K., & Gupta, S. K. (2021). Greener production of silver nanoparticles: a



- sensitive nanodrop spectrophotometric determination of biothiols. *Chemical Papers*, 75(7), 3327-3336. doi:10.1007/s11696-021-01565-3
- Chandrasekharan, S., Chinnasamy, G., & Bhatnagar, S. (2022). Sustainable phyto-fabrication of silver nanoparticles using *Gmelina arborea* exhibit antimicrobial and biofilm inhibition activity. *Scientific Reports*, 12(1), 156. doi:10.1038/s41598-021-04025-w
- Dong, Z. Y., Narsing Rao, M. P., Xiao, M., Wang, H. F., Hozzein, W. N., Chen, W., & Li, W. J. (2017). Antibacterial activity of silver nanoparticles against *Staphylococcus warneri* synthesized using endophytic bacteria by photo-irradiation. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1090. doi:10.3389/fmicb.2017.01090
- Doriya, K., & Kumar, D. S. (2016). Isolation and screening of L-asparaginase free of glutaminase and urease from fungal sp. *3 Biotech*, 6(2), 239. doi:10.1007/s13205-016-0544-1
- Elbahnasawy, M. A., Shehabeldine, A. M., Khattab, A. M., Amin, B. H., & Hashem, A. H. (2021). Green biosynthesis of silver nanoparticles using novel endophytic *Rothia endophytica*: Characterization and anticandidal activity. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 62, 102401. doi:10.1016/j.jddst.2021.102401
- Elnady, A., Sorour, N. M., & Abbas, R. N. (2022). Characterization, cytotoxicity, and genotoxicity properties of novel biomediated nanosized-silver by Egyptian *Streptomyces roseolus* for safe antimicrobial applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(3), 47. doi:10.1007/s11274-022-03231-6
- Hu, X., Wu, L., Du, M., & Wang, L. (2022). Eco-friendly synthesis of size-controlled silver nanoparticles by using *Areca catechu* nut aqueous extract and investigation of their potent antioxidant and anti-bacterial activities. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(5), 103763. doi:10.1016/j.arabjc.2022.103763
- Hussein, A. A., & Alsharifi, M. R. (2021). Antimicrobial activity of silver nanoparticles against *Proteus mirabilis* isolated from patients with food diabetes ulcer. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19(5), 853-860. doi:10.22124/cjes.2021.5243
- Husseiny, M. I., Abd El-Aziz, M., Badr, Y., & Mahmoud, M. A. (2007). Biosynthesis of gold nanoparticles using *Pseudomonas aeruginosa*. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 67(3-4), 1003-1006. doi:10.1016/j.saa.2006.09.028
- John, M. S., Nagoth, J. A., Ramasamy, K. P., Mancini, A., Giuli, G., Natalello, A., ... & Pucciarelli, S. (2020). Synthesis of bioactive silver nanoparticles by a *Pseudomonas* strain associated with the antarctic psychrophilic protozoon *Euplotes focardii*. *Marine Drugs*, 18(1), 38. doi:10.3390/md18010038
- Kapoor, R. T., Salvadori, M. R., Rafatullah, M., Siddiqui, M. R., Khan, M. A., & Alshareef, S. A. (2021). Exploration of microbial factories for synthesis of nanoparticles – A sustainable approach for bioremediation of environmental contaminants. *Frontiers in Microbiology*, 12, 658294. doi:10.3389/fmicb.2021.658294
- Khan, S. T., Malik, A., Wahab, R., Abd-Elkader, O. H., Ahamed, M., Ahmad, J., ... & Al-Khedhairi, A. A. (2017). Synthesis and characterization of some abundant nanoparticles, their antimicrobial and enzyme inhibition activity. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, 64(2), 203-216. doi:10.1556/030.64.2017.004
- Khan, F., Kang, M.-G., Jo, D.-M., Chandika, P., Jung, W.-K., Kang, H. W., & Kim, Y.-M. (2021). Phloroglucinol-gold and -zinc oxide nanoparticles: Antibiofilm and antivirulence activities towards *Pseudomonas aeruginosa* PAO1. *Marine Drugs*, 19(11), 601. doi:10.3390/md19110601
- Khan, U., Arshad, N., Sultana, R., Hashim, J., Sheikh, H., Zaidi, W., & Khan, S. (2022). Synthesis of dihydropyrimidine stabilized silver nanoparticles with significant anti urease and catalytic applications. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 35(3 (Special)), 923-930.
- Khandel, P., & Shahi, S. K. (2018). Mycogenic nanoparticles and their bio-prospective applications: Current status and future challenges. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 8(4), 369-391. doi:10.1007/s40097-018-0285-2
- Koul, B., Poonia, A. K., Yadav, D., & Jin, J. O. (2021). Microbe-mediated biosynthesis of nanoparticles: Applications and future prospects. *Biomolecules*, 11(6), 886. doi:10.3390/biom11060886
- Lange, A., Grzenia, A., Wierzbicki, M., Strojny-Cieslak, B., Kalińska, A., Gołębiowski, M., ... & Jaworski, S. (2021). Silver and copper nanoparticles inhibit biofilm formation by mastitis

- pathogens. *Animals*, 11(7), 1884. doi:10.3390/ani11071884
- Lashin, I., Fouda, A., Gobouri, A. A., Azab, E., Mohammedsahleh, Z. M., & Makharita, R. R. (2021). Antimicrobial and in vitro cytotoxic efficacy of biogenic silver nanoparticles (Ag-NPs) fabricated by callus extract of *Solanum incanum* L. *Biomolecules*, 11(3), 341. doi:10.3390/biom11030341
- Lee, N. Y., Ko, W. C., & Hsueh, P. R. (2019). Nanoparticles in the treatment of infections caused by multidrug-resistant organisms. *Frontiers in Pharmacology*, 10, 1-10. doi:10.3389/fphar.2019.01153
- Loharch, S., & Berlicki, Ł. (2022). Rational development of bacterial ureases inhibitors. *The Chemical Record*, 22(8), e202200026. doi:10.1002/tcr.202200026
- Loo, Y. Y., Rukayadi, Y., Nor-Khaizura, M. A. R., Kuan, C. H., Chieng, B. W., Nishibuchi, M., & Radu, S. (2018). In vitro antimicrobial activity of green synthesized silver nanoparticles against selected gram-negative foodborne pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1555. doi:10.3389/fmicb.2018.01555
- Maniraj, A., Kannan, M., Rajarathinam, K., Vivekanandhan, S., & Muthuramkumar, S. (2019). Green synthesis of silver nanoparticles and their effective utilization in fabricating functional surface for antibacterial activity against multi-drug resistant *Proteus mirabilis*. *Journal of Cluster Science*, 30, 1403-1414. doi:10.1007/s10876-019-01582-z
- Mohamed, A. A., Abu-Elghait, M., Ahmed, N. E., & Salem, S. S. (2021). Eco-friendly mycogenic synthesis of ZnO and CuO nanoparticles for in vitro antibacterial, antibiofilm, and antifungal applications. *Biological Trace Element Research*, 199(7), 2788-2799. doi:10.1007/s12011-020-02369-4
- Mohanta, Y. K., Biswas, K., Jena, S. K., Hashem, A., Abd\_Allah, E. F., & Mohanta, T. K. (2020). Antibiofilm and antibacterial activities of silver nanoparticles synthesized by the reducing activity of phytoconstituents present in the Indian medicinal plants. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1143. doi:10.3389/fmicb.2020.01143
- Morou-Bermudez, E., Rodriguez, S., Bello, A. S., & Dominguez-Bello, M. G. (2015). Urease and dental plaque microbial profiles in children. *PLOS One*, 10(9), e0139315. doi:10.1371/journal.pone.0139315
- Ozidal, M., Ozdal, O. G., & Algur, O. F. (2016). Isolation and characterization of  $\alpha$ -Endosulfan degrading bacteria from the microflora of cockroaches. *Polish Journal of Microbiology*, 65(1), 63-68. doi:10.5604/17331331.1197325
- Ozidal, M., & Gurkok, S. (2022a). Recent advances in nanoparticles as antibacterial agent. *ADMET and DMPK*. 10(2), 115-129. doi:10.5599/admet.1172
- Ozidal, M., & Gurkok, S. (2022b). Mechanisms of Nanoparticles Biosynthesis by Microorganisms. In T. Çakıcı (Ed.), *The Trends in Nano Materials Synthesis and Applications* (pp. 81-98). İstanbul, Türkiye: Efe Academy.
- Pernas-Pleite, C., Conejo-Martínez, A. M., Marín, I., & Abad, J. P. (2022). Green extracellular synthesis of silver nanoparticles by *Pseudomonas allopuntida*, their growth and biofilm-formation inhibitory activities and synergic behavior with three classical antibiotics. *Molecules*, 27(21), 7589. doi:10.3390/molecules27217589
- Ponnuvel, S., Subramanian, B., & Ponnuraj, K. (2015). Conformational change results in loss of enzymatic activity of jack bean urease on its interaction with silver nanoparticle. *The Protein Journal*, 34(5), 329-337. doi:10.1007/s10930-015-9627-9
- Sajjad, A., Bhatti, S. H., Ali, Z., Jaffari, G. H., Khan, N. A., Rizvi, Z. F., & Zia, M. (2021). Photoinduced fabrication of zinc oxide nanoparticles: Transformation of morphological and biological response on light irradiance. *ACS Omega*, 6(17), 11783-11793. doi:10.1021/acsomega.1c01512
- Salem, S. S., Badawy, M. S. E. M., Al-Askar, A. A., Arishi, A. A., Elkady, F. M., & Hashem, A. H. (2022). Green biosynthesis of selenium nanoparticles using orange peel waste: Characterization, antibacterial and antibiofilm activities against multidrug-resistant bacteria. *Life*, 12(6), 893. doi:10.3390/life12060893
- Seo, M., Oh, T., & Bae, S. (2021). Antibiofilm activity of silver nanoparticles against biofilm forming *Staphylococcus pseudintermedius* isolated from dogs with otitis externa. *Veterinary Medicine and Science*, 7(5), 1551-1557. doi:10.1002/vms3.554
- Shah, M., Fawcett, D., Sharma, S., Tripathy, S. K., & Poinern, G. E. J. (2015). Green synthesis of



- metallic nanoparticles via biological entities. *Materials*, 8(11), 7278-7308. doi:10.3390/ma8115377
- Sharifi-Rad, M., Pohl, P., & Epifano, F. (2021). Phytofabrication of silver nanoparticles (AgNPs) with pharmaceutical capabilities using *Otostegia persica* (Burm.) Boiss. leaf extract. *Nanomaterials*, 11(4), 1045. doi:10.3390/nano11041045
- Singh, P., Kim, Y.-J., Zhang, D., & Yang, D.-C. (2016). Biological synthesis of nanoparticles from plants and microorganisms. *Trends in Biotechnology*, 34(7), 588-599. doi:10.1016/j.tibtech.2016.02.006
- Ullah, R., Azam, A., Aziz, T., Farhan, Rehman, H. U., Qiao, S., & Hameed, A. (2022). Peacock feathers extract use as template for synthesis of Ag and Au nanoparticles and their biological applications. *Waste and Biomass Valorization*, 13(1), 659-666. doi:10.1007/s12649-021-01537-4
- Wasfi, R., Hamed, S. M., Amer, M. A., & Fahmy, L. I. (2020). *Proteus mirabilis* Biofilm: Development and therapeutic strategies. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 10, 414. doi:10.3389/fcimb.2020.00414
- Yang, J., Wang, Q., Wang, C., Yang, R., Ahmed, M., Kumaran, S., Velu, P., & Li, B. (2020). *Pseudomonas aeruginosa* synthesized silver nanoparticles inhibit cell proliferation and induce ROS mediated apoptosis in thyroid cancer cell line (TPC1). *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 48(1), 800-809. doi:10.1080/21691401.2019.1687495



Research Article

**Investigation of Structural, Elastic, and Piezoelectric Properties of NbSbO<sub>4</sub> Crystal**

**Mehmet ERZEN**

Van Yuzuncu Yil University, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of Physics, 65080, Van, Türkiye

Mehmet ERZEN, ORCID No: 0000-0002-7716-8608

Corresponding author e-mail: merzennn@gmail.com

**Article Info**

Received: 21.07.2022

Accepted: 31.01.2023

Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1146717

**Keywords**

Abinit,  
DFT,  
Elastic properties,  
MTEX,  
NbSbO<sub>4</sub>,  
Piezoelectric properties

**Abstract:** The structural, elastic, and piezoelectric properties of the NbSbO<sub>4</sub> crystal were calculated based on the density functional theory. These properties were calculated using the ABINIT package program under both the generalized gradient approximation and the local density approximation. The elastic stiffness tensor and the elastic compliance tensor for the NbSbO<sub>4</sub> crystal were calculated in the ground state. Voigt Bulk Modulus, Reuss Bulk Modulus, Hill Bulk Modulus, Voigt Shear Modulus, Reuss Shear Modulus, Hill Shear Modulus, Young Modulus, Poisson Ratio, Flexibility Coefficient, Debye temperature, Longitudinal sound wave velocity for NbSbO<sub>4</sub> crystal using elastic stiffness and elastic compliance tensor, Transverse sound wave velocity and Average speed of sound were calculated. Then, the ground state piezoelectric tensor of the NbSbO<sub>4</sub> crystal was calculated. Accordingly, 2D longitudinal surfaces and 3D representation surfaces of the piezoelectric tensor were obtained using MTEX software. The properties obtained with both the generalized gradient approximation and the local density approximation are compared. As a result of the calculations, it was understood that the material was a flexible and formable material in both approximations.

**NbSbO<sub>4</sub> Kristalinin Yapısal, Elastik ve Piezoelektrik Özelliklerinin İncelenmesi**

**Makale Bilgileri**

Geliş: 21.07.2022

Kabul: 31.01.2023

Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1146717

**Anahtar Kelimeler**

Abinit,  
DFT,  
Elastik özellikler,  
MTEX,  
NbSbO<sub>4</sub>,  
Piezoelektrik özellikler

**Öz:** NbSbO<sub>4</sub> kristalinin yapısal, elastik ve piezoelektrik özellikleri, yoğunluk fonksiyonel teorisine dayalı olarak hesaplandı. Bu özellikler için hesaplamalar hem genelleştirilmiş gradyent hem de yerel yoğunluk yaklaşımı altında ABINIT paket programı kullanılarak yapılmıştır. NbSbO<sub>4</sub> kristali için elastik sertlik tensörü ve elastik uyum tensörü, temel durumda hesaplanmıştır. Elastik sertlik ve elastik uyum tensörü kullanılarak NbSbO<sub>4</sub> kristali için Voigt Bulk Modülü, Reuss Bulk Modülü, Hill Bulk Modülü, Voigt Shear Modülü, Reuss Shear Modülü, Hill Shear Modülü, Young Modülü, Poisson Oranı, Esneklik Katsayısı, Debye sıcaklığı, boyuna ses dalgası hızı, enine ses dalgası hızı ve ortalama ses hızı hesaplanmıştır. Daha sonra NbSbO<sub>4</sub> kristalinin temel durumda piezoelektrik tensörü hesaplandı. Buna bağlı olarak, MTEX yazılımı kullanılarak piezoelektrik tensörünün 2 boyutta boyuna yüzeyleri ve 3 boyutta temsil yüzeyleri elde edilmiştir. Hem genelleştirilmiş gradyent yaklaşımı hem de yerel yoğunluk yaklaşımları ile elde edilen özellikler karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda malzemenin her iki yaklaşım için de esnek ve şekillendirilebilir bir malzeme olduğu anlaşılmıştır.

## 1. Introduction

In 1973 Muller and Roy summarized the phase transformations in ABO<sub>4</sub> type compounds. They have presented a diagram based on the coordination numbers of both cations versus relative volume change. From the diagram one can see that ABO<sub>4</sub> type compounds crystallize in many different structure types, and many different types of phase changes occur in them (Müller & Roy, 1973; Fukunaga & Yamaoka, 1979). The word Piezoelectric comes from Greek, meaning electricity caused by pressure. In the middle of the eighteenth century, Carolus Linnaeus and Franz Aepinus first observed that certain materials, such as crystals and some ceramics, generate electric charges in case of a temperature change. Both René Just Haüy and Antoine César Becquerel subsequently attempted to investigate the phenomena further but were unsuccessful (Dineva et al., 2014). Piezoelectricity as a research field in crystal physics was initiated by the brothers Jacques Curie (1856–1941) and Pierre Curie (1859–1906) with their studies (Curie & Curie, 1880; Dineva et al., 2014). They found that tension and compression produce voltages of opposite polarity and are proportional to the applied load. This phenomenon was called the piezoelectric effect by Hankel (Bouty, 1883). There are many studies on NbSbO<sub>4</sub> crystals in the literature. SbNbO<sub>4</sub> compound, formed in the ternary system of Nb-Sb-O, was obtained for the first time by high-energy ball milling of an equimolar oxide Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mixture in an argon atmosphere. This compound is X-ray diffraction, differential thermal analysis-thermal gravimetry, characterized by infrared and scanning electron microscopy methods (Dulian et al., 2014). Experimental vibrational spectroscopic study of solid solutions for ferroelectric SbNbO<sub>4</sub> and antiferroelectric BiNbO<sub>4</sub> crystals was performed (Ayyub et al., 1986). In 1998, thin ferroelectric films of SbNbO<sub>4</sub> oriented on Si were synthesized by pulsed laser ablation (Chattopadhyay et al., 1998). The structural properties of the SbNbO<sub>4</sub> crystal were obtained using an x-ray/diffractometry (Rannev et al., 1976). The effects of both  $\gamma$ -ray irradiation and annealing temperature on the optical absorption spectra of SbNbO<sub>4</sub> films deposited on MgO or quartz substrates in a certain spectral range were investigated (El-Fadl et al., 2003). A study was conducted on the photophysical and photocatalytic water separation performance of SbMO<sub>4</sub> (M = Nb, Ta) compounds and some properties such as electronic band structure, and density of state were obtained (Kim et al., 2012). Some thermodynamic properties have been obtained for SbNbO<sub>4</sub> and SbSbO<sub>4</sub> crystals (Knauth & Schwitzgebel, 1988 and 1990). An experimental study was conducted on the effect of gamma radiation and heat treatment on the optical properties of SbNbO<sub>4</sub> ferroelectric thin films. In addition, the structural and optical properties of the SbNbO<sub>4</sub> crystal were obtained experimentally (Mohamad et al., 1998 and 2001). The dielectric and nonlinear optical properties of SbNbO<sub>4</sub>, SbTaO<sub>4</sub>, BiNbO<sub>4</sub> and BiTaO<sub>4</sub> crystals were obtained. In addition, structural properties of SbNbO<sub>4</sub> and some other crystals were obtained (Popolitov et al., 1974 and 1982). A study was conducted on the first synthesis of oriented SbNbO<sub>4</sub> ferroelectric thin films on Pt-coated silicon substrates (Qu & Lévy, 1995). In 2018, a study was conducted on the Electrochemical Reaction of Lithium with the SbNbO<sub>4</sub>-ReO<sub>3</sub> Structural Type Phase. In addition, their structures and electrochemical properties were investigated by X-ray diffraction (XRD) and galvanostatic charge-discharge test measurements (Saritha, 2018). Spontaneous Polarization of Fe-Doped SbNbO<sub>4</sub> Crystal was obtained experimentally (Shaldin, 2002).

## 2. Material and Methods

### 2.1. Structural optimization

The unit cell of the NbSbO<sub>4</sub> crystal with the *Pnma*2<sub>1</sub> space group consists of 24 atoms. The unit cell of the NbSbO<sub>4</sub> crystal is given in Figure 1 (Momma & Izumi, 2011). In the literature, the lattice parameters of the NbSbO<sub>4</sub> crystal are given as a= 9.55 Bohr, b= 10.73 Bohr, and c= 22.66 Bohr (Jain et al., 2013). Using these given lattice parameters, first, structural optimization was made for the unit cell of the NbSbO<sub>4</sub> crystal by means of the ABINIT (Gonze et al., 2002) package program within the framework of density functional theory. Self-consistent, norm-converging pseudopotentials of the Troullier-Martins type (Troullier & Martins, 1991) pseudo potentially generated by the FHI (FHI98PP) code (Fuchs & Scheffler, 1999) were used. Also, both the generalized gradient approximation (GGA) and the local density approximation (LDA) were used to solve the Khon-Sham equations (Kohn & Sham, 1965). As a result of the optimization, the cut-off energy value for both

GGA and LDA approximations was determined as 35 Hartree, as seen in Figure 2. In addition, the Brillouin Zone (BZ) 10×10×10 Monkhorst–Pack mesh grid was used for both the GGA and LDA approximations (Monkhorst & Pack, 1976). In addition, the volume value corresponding to the minimum energy value as a result of the optimization was calculated as 2415.8914 bohr<sup>3</sup> and 2208.3178 bohr<sup>3</sup> for both the GGA and LDA approximations, respectively. The energy-volume graph for the NbSbO<sub>4</sub> crystal is given in Figure 3.

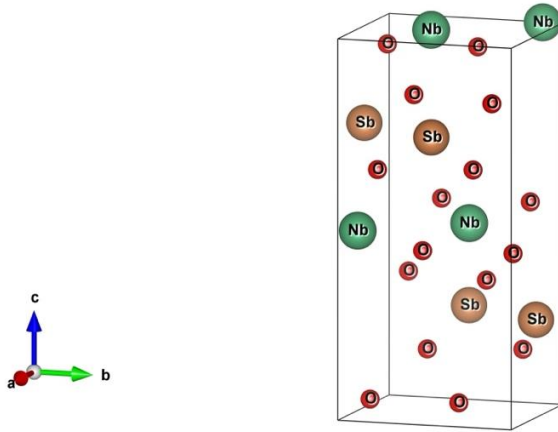


Figure 1. The unit cell of NbSbO<sub>4</sub> crystal.

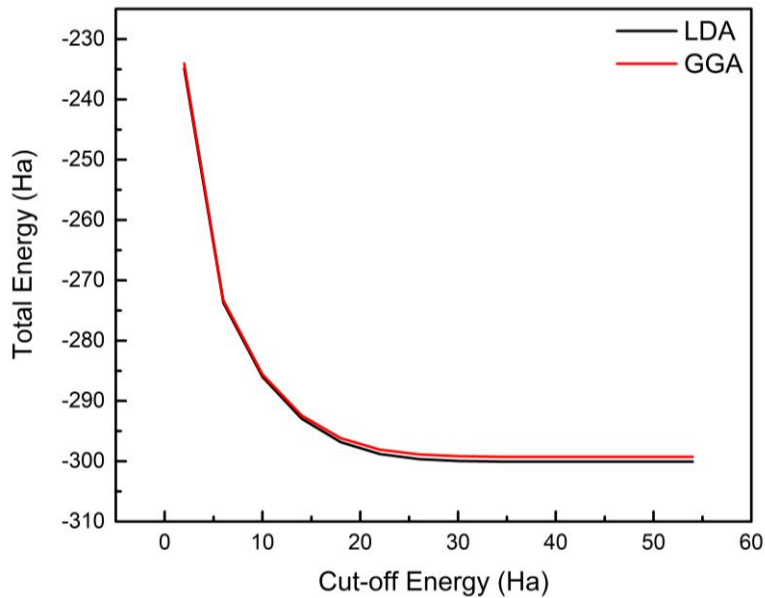


Figure 2. Cut-off energy curves for NbSbO<sub>4</sub> crystal under both GGA and LDA approximations.

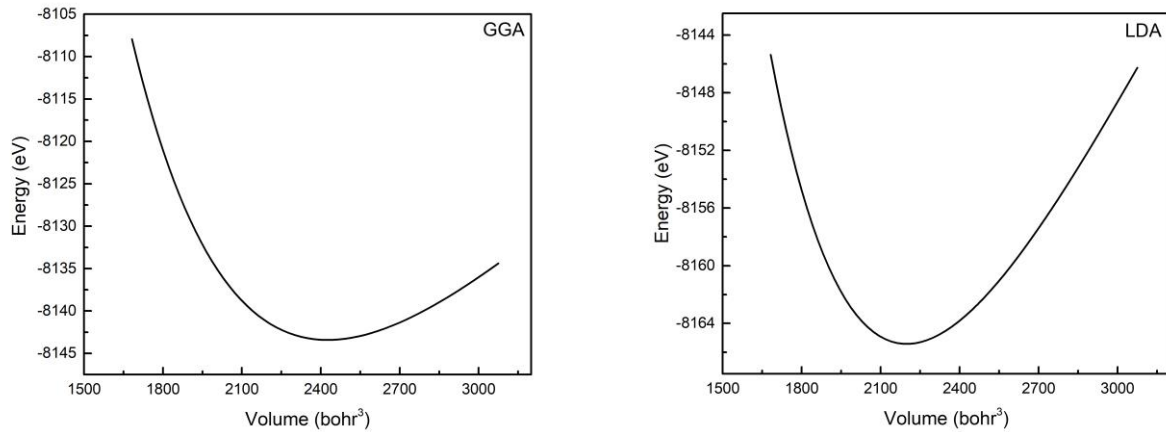


Figure 3. The curve of total energy volume of the primitive cell of NbSbO<sub>4</sub> crystal.

## 2.2. Elastic and piezoelectric properties

Then, the elastic stiffness tensor ( $C_{ij}$ ) of the NbSbO<sub>4</sub> crystal in the ground state was calculated using the optimized lattice parameters. The independent components of the elastic constants vary according to the crystal structures (Nye, 1985). These components show the quantities associated with the material, such as stiffness, expansion, and shear deformations. The NbSbO<sub>4</sub> in orthorhombic crystal structure exhibits 9 independent components:  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{55}$ , and  $C_{66}$ . These calculated elastic constants ( $C_{ij}$ ) for NbSbO<sub>4</sub> crystal are given in Table 1 and Table 2. The elastic compliance tensor ( $S_{ij}$ ) of the NbSbO<sub>4</sub> crystal was calculated by means of these components. Then, using the components of  $C_{ij}$  and  $S_{ij}$  tensors, Bulk Modulus, Shear Modulus, Young Modulus, Poisson Ratio, Flexibility Coefficient, Debye temperature, Longitudinal sound wave velocity, Transverse sound wave velocity, and average speed of sound were calculated for the NbSbO<sub>4</sub> crystal. These calculated values for both GGA and LDA approximations are given in Table 3. For an ideal elastic incompressible material, the value of Poisson's ratio is 0.5. The Poisson ratio for most engineering materials ranges from 0.25 to 0.33. The Poisson ratio value is equal to 0.1 for covalent materials, 0.25 for ionic materials, and 0.33 for metallic materials (Köster & Franz, 1961).

The Poisson ratio calculated for the NbSbO<sub>4</sub> crystal under both the GGA and LDA approximations, respectively, is 0.276 and 0.278. Therefore, the NbSbO<sub>4</sub> crystal dominates an ionic crystal structure. Materials have a large stress value that will remain under the influence without deformation. This value is called the flexibility limit. When the flexibility limit is exceeded, the shape of the material changes, bends, or breaks. If the Flexibility Coefficient is greater than 1.75, the materials are ductile, otherwise, the material is one the brittle materials (Pugh, 1954). The Flexibility Coefficient calculated for NbSbO<sub>4</sub> crystal under both GGA and LDA approaches, respectively, is 1.90 and 1.92. This indicates that the NbSbO<sub>4</sub> crystal is a formable material.

Table 1. Elastic constants of NbSbO<sub>4</sub> crystal under GGA approximation (GPa)

$C_{ij}$	1	2	3	4	5	6
1	243.1	149.8	119.5	0	0	0
2	149.8	283	101.5	0	0	0
3	119.5	101.5	280.8	0	0	0
4	0	0	0	77.7	0	0
5	0	0	0	0	105.4	0
6	0	0	0	0	0	149.7



Table 2. Elastic constants of NbSbO<sub>4</sub> crystal under LDA approximation (GPa)

C <sub>ij</sub>	1	2	3	4	5	6
1	311.4	197.2	162.9	0	0	0
2	197.2	356.1	130.3	0	0	0
3	162.9	130.3	386.6	0	0	0
4	0	0	0	100	0	0
5	0	0	0	0	143.5	0
6	0	0	0	0	0	199.4

Table 3. The elastic properties of NbSbO<sub>4</sub> crystal

Property	Symbol (Unit)	Value (GGA)	Value (LDA)
Voight Bulk Modulus	B <sub>V</sub> (GPa)	172	226
Reuss Bulk Modulus	B <sub>R</sub> (GPa)	172	226
Bulk Modulus VRH Average	B <sub>VRH</sub> (GPa)	172	226
Voight Shear Modulus	G <sub>V</sub> (GPa)	96	126
Reuss Shear Modulus	G <sub>R</sub> (GPa)	85	109
Shear Modulus VRH Average	G <sub>VRH</sub> (GPa)	90	118
Young Modulus	E (GPa)	231	301
Poisson Ratio	$\nu$ (-)	0.276	0.278
Flexibility Coefficient	K (-)	1.90	1.92
Debye Temperature (K)	$\Theta_D$	302.8	345.6
Longitudinal Sound Wave Velocity (v <sub>l</sub> )	(m/s)	7005.9	8021.0
Transverse Sound Wave Velocity (v <sub>t</sub> )	(m/s)	3896.1	4447.1
Average Speed of Sound (v <sub>m</sub> )	(m/s)	4339	4954

Then, the piezoelectric properties of the NbSbO<sub>4</sub> crystal were investigated. To examine the piezoelectric properties of the NbSbO<sub>4</sub> crystal, geometric optimization was performed for the unit cell of the NbSbO<sub>4</sub> crystal, using the lattice parameters and atomic positions given in the literature. While making this calculation, the positions of the Nb atoms forming the unit cell of the NbSbO<sub>4</sub> crystal were kept constant. The positions of the remaining atoms and the lattice parameters were recalculated using the ABINIT package program. Parameters obtained under both GGA and LDA approximations are given in Table 4. The crystal's piezoelectric tensor ( $d_{ijk}$ ) was calculated using the new lattice parameters and atomic positions calculated for the NbSbO<sub>4</sub> crystal. The number of independent components of the piezoelectric tensor varies depending on the number of axes of rotation and reflection of the crystal structures. The orthorhombic NbSbO<sub>4</sub> crystal belongs to the *mm2* point group. Hence the piezoelectric tensor for the NbSbO<sub>4</sub> crystal has five independent components. The calculated piezoelectric tensor of NbSbO<sub>4</sub> under different approximations is given in Table 5 and Table 6.

Table 4. Calculated lattice parameters and atomic positions for NbSbO<sub>4</sub> crystal

GGA a= 9.69 Bohr, b= 10.73 Bohr, c= 22.80 Bohr			LDA a= 9.29 Bohr, b= 10.30 Bohr, c= 21.89 Bohr		
x	y	z	x	y	z
0.5090	0.6125	0.4994	0.5090	0.6125	0.4994
0.4910	0.3875	0.9994	0.4910	0.3875	0.9994
0.9910	0.1125	0.4994	0.9910	0.1125	0.4994
0.0090	0.8875	0.9994	0.0090	0.8875	0.9994
0.4421	0.9751	0.2514	0.4494	0.9742	0.2516
0.5579	0.0249	0.7514	0.5506	0.0258	0.7516

Table 4. Calculated lattice parameters and atomic positions for NbSbO<sub>4</sub> crystal (continued)

GGA a= 9.69 Bohr, b= 10.73 Bohr, c= 22.80 Bohr			LDA a= 9.29 Bohr, b= 10.30 Bohr, c= 21.89 Bohr		
x	y	z	x	y	z
0.0579	0.4751	0.2514	0.0506	0.4742	0.2516
0.9421	0.5249	0.7514	0.9494	0.5258	0.7516
0.2277	0.8650	0.5476	0.2263	0.8556	0.5498
0.7723	0.1350	0.0476	0.7737	0.1444	0.0498
0.2723	0.3650	0.5476	0.2737	0.3556	0.5498
0.7277	0.6350	0.0476	0.7263	0.6444	0.0498
0.3333	0.6560	0.3391	0.3337	0.6493	0.3393
0.6667	0.3440	0.8391	0.6663	0.3507	0.8393
0.1667	0.1560	0.3391	0.1663	0.1493	0.3393
0.8333	0.8440	0.8391	0.8337	0.8507	0.8393
0.1695	0.8177	0.1519	0.1713	0.8217	0.1523
0.8305	0.1823	0.6519	0.8287	0.1783	0.6523
0.3305	0.3177	0.1519	0.3287	0.3217	0.1523
0.6695	0.6823	0.6519	0.6713	0.6783	0.6523
0.2077	0.5845	0.9379	0.2056	0.5920	0.9356
0.7923	0.4155	0.4379	0.7944	0.4080	0.4356
0.2923	0.0845	0.9379	0.2944	0.0920	0.9356
0.7077	0.9155	0.4379	0.7056	0.9080	0.4356

Table 5. Calculated piezoelectric constant for NbSbO<sub>4</sub> crystal under GGA approximation (C/m<sup>2</sup>)

$d_{ij}$	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	-0.0135	0
2	0	0	0	-0.0062	0	0
3	0.0922	0.0918	-0.2110	0	0	0

Table 6. Calculated piezoelectric constant for NbSbO<sub>4</sub> crystal under LDA approximation (C/m<sup>2</sup>)

$d_{ij}$	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	-0.0256	0
2	0	0	0	-0.0012	0	0
3	0.10032	0.1382	-0.2570	0	0	0

The piezoelectric effect is reversible, so removing the stress will eliminate the induced electric field. MTEX code (Bachmann et al., 2010) is a toolbox of comprehensive, freely available MATLAB software (The MathWorks Inc., 2020) that covers a wide variety of problems in texture analysis. The piezoelectric tensor ( $d$ ) is a 3-rank tensor. Hence the piezoelectric tensor obeys the tensor transformation law of  $d'_{ijk} = a_{il} a_{jm} a_{kn} d_{lmn}$ , which all third-order tensors obey. Where quantities such as  $a_{il}$  are the rotation matrices between  $d'_{ijk}$ , and  $d_{lmn}$ . This means that the crystal structure will remain unchanged when a rotation is applied over the point group to which it belongs (Nye, 1985). Here, piezoelectric representation surfaces for crystals can be studied by defining MTEX, Euler angles, quaternions, and axis/angle pairs. Piezoelectric properties for the crystal structure were

investigated with the help of MTEX using the calculated axis lengths, interaxial angles, and piezoelectric tensor for the NbSbO<sub>4</sub> crystal.  $x//a$ ,  $y//b$ , and  $z//c$  for the cartesian coordinates given in the figures. Tensors can be represented geometrically. For example, 0th order tensors are sphere, 1st order tensors are vector, 2nd order tensors are quadric, 3rd order tensors are cubic, and 4th order tensors are quartic. In general, the representation surfaces of these tensors are given in Figure 4 (Newnham, 2005).

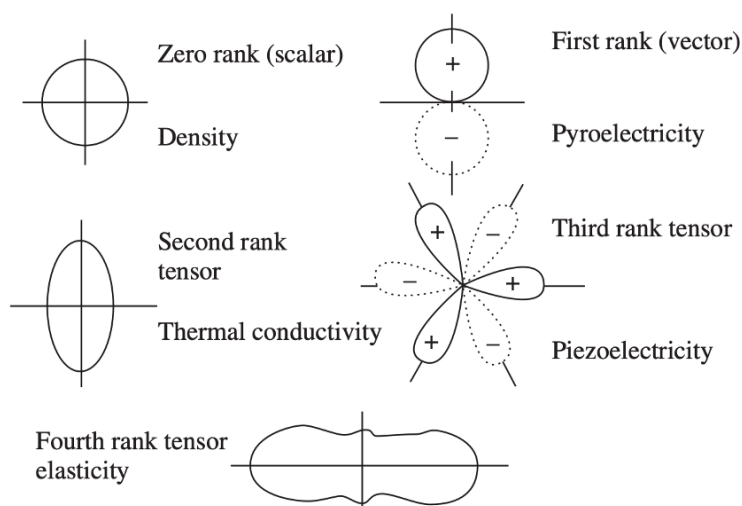


Figure 4. Representation surfaces for tensors.

The piezoelectric tensor can be visualized in various ways via MTEX. These visualizations are determined by the value of the piezoelectric tensor in the direction of the cartesian axes. With the 'section' option of the MTEX drawing command, a longitudinal representation surface for a crystal with piezoelectric property in 2 dimensions can be drawn. The longitudinal piezoelectric representation surface of the NbSbO<sub>4</sub> crystal in 2 dimensions in different axes and under different approximations is calculated and given in Figure 5 and Figure 6. As seen in Figure 5 and Figure 6, there is no polarization in the regions outside the longitudinal limiting surfaces. In MTEX the magnitude of a piezoelectric tensor can be plotted as a function of crystal direction in the tensor frame on an equal area stereogram, either as the crystallographic asymmetric unit, as a complete hemisphere or even as both hemispheres. The plot of both hemispheres shows the 3D distribution of the piezoelectric tensor  $d$  values in  $C/m^2$  (Mainprice et al., 2015). As can be seen in Figure 7 and Figure 8, the distributions of the upper and lower hemispheres are different under both the GGA and LDA approximations. The 3-D representation surface drawn with the piezoelectric tensor determines the maximum piezoelectric modulus of the material and the crystallographic direction in which this modulus arises. In cubic structures, this direction is clear. But that of other piezoelectric crystal classes is more complex. The 3-D piezoelectric tensor drawn for NbSbO<sub>4</sub> crystal under both GGA and LDA approximations is given in the  $C/m^2$  unit in Figure 9 and Figure 10. The piezoelectric representation surfaces drawn for the NbSbO<sub>4</sub> crystal generally agree with the representation surfaces drawn for the  $mm2$  point group (De Jong et al., 2015).

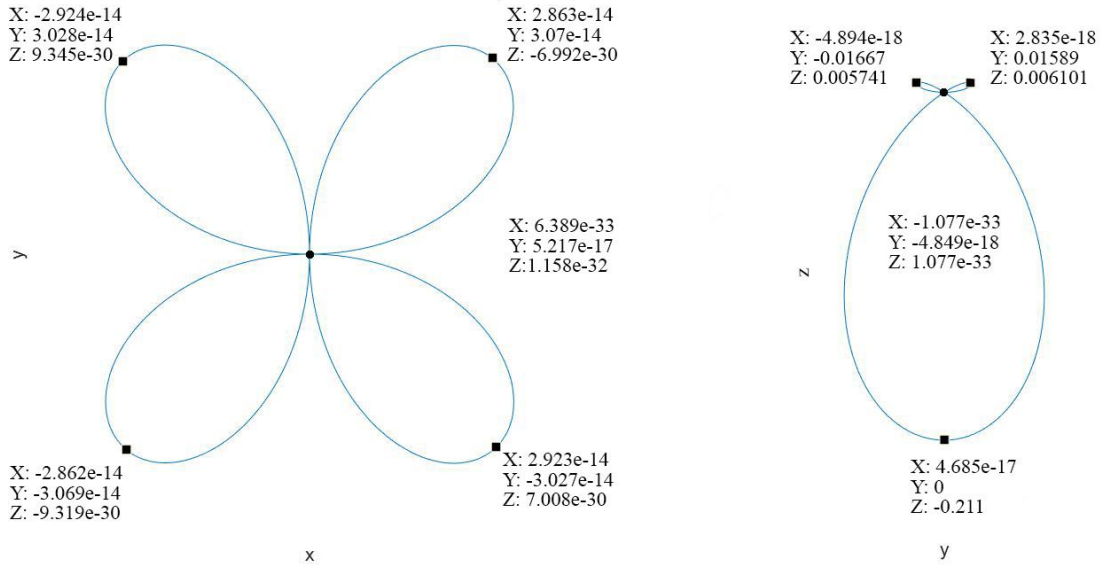


Figure 5. The plot of the longitudinal surfaces of the piezoelectric tensor for the NbSbO<sub>4</sub> crystal under the GGA approximation. Left side: z plane, Right side: x plane (Units: C/m<sup>2</sup>).

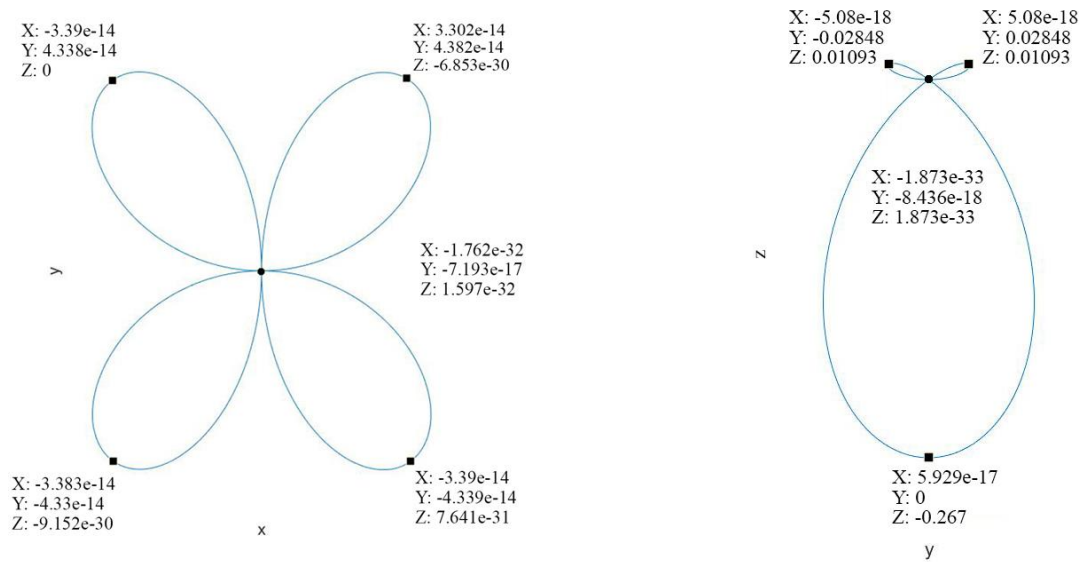


Figure 6. The plot of the longitudinal surfaces of the piezoelectric tensor for the NbSbO<sub>4</sub> crystal under the LDA approximation. Left side: z plane, Right side: x plane (Units: C/m<sup>2</sup>).

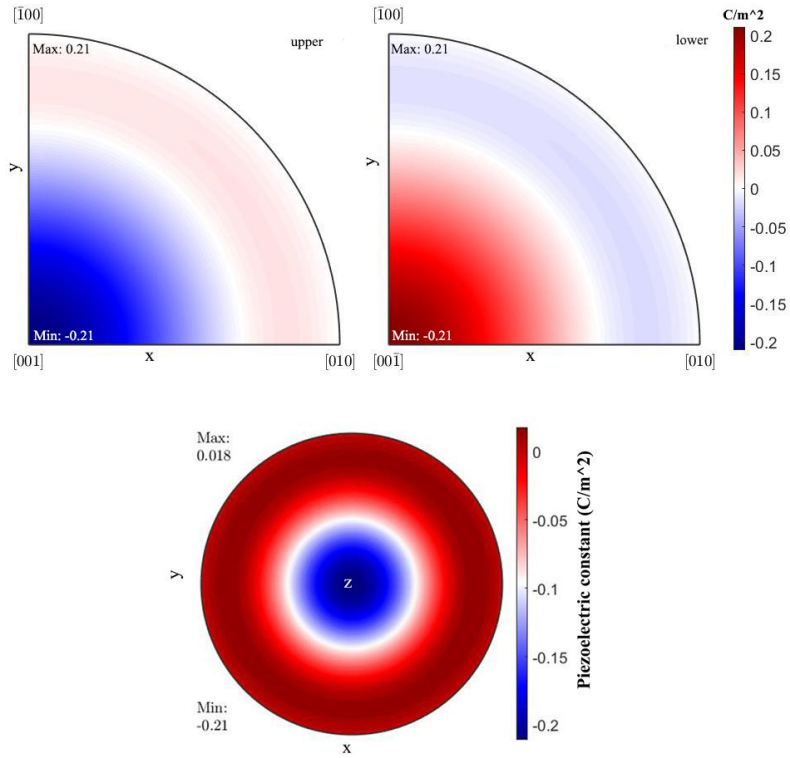


Figure 7. Plots of the piezoelectric tensor of the NbSbO<sub>4</sub> crystal under the GGA approximation of the upper, lower hemisphere, and full sphere in the x-y plane (Units: C/m<sup>2</sup>).

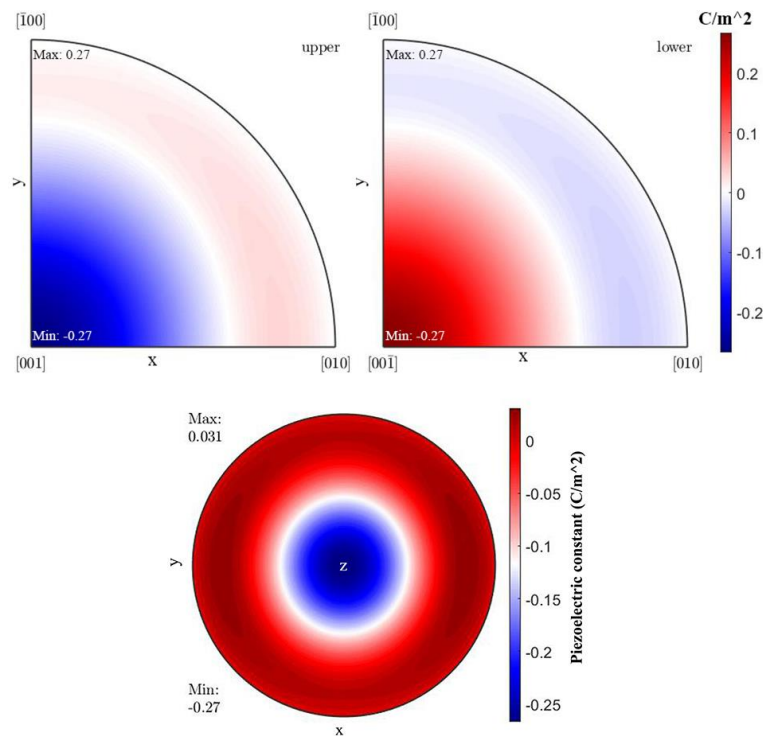


Figure 8. Plots of the piezoelectric tensor of the NbSbO<sub>4</sub> crystal under the LDA approximation of the upper, lower hemisphere, and full sphere in the x-y plane (Units: C/m<sup>2</sup>).



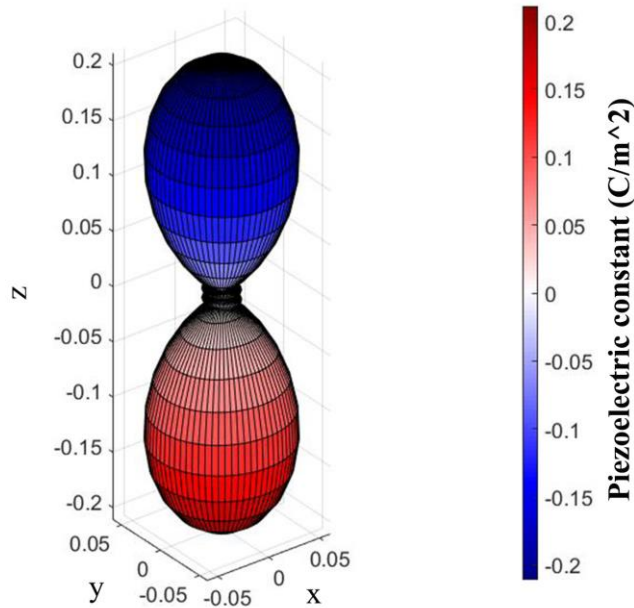


Figure 9. 3D drawing of the piezoelectric tensor for the NbSbO<sub>4</sub> crystal under the GGA approximation. It corresponds to the red (positive) and blue (negative) lobes (Units: C/m<sup>2</sup>).

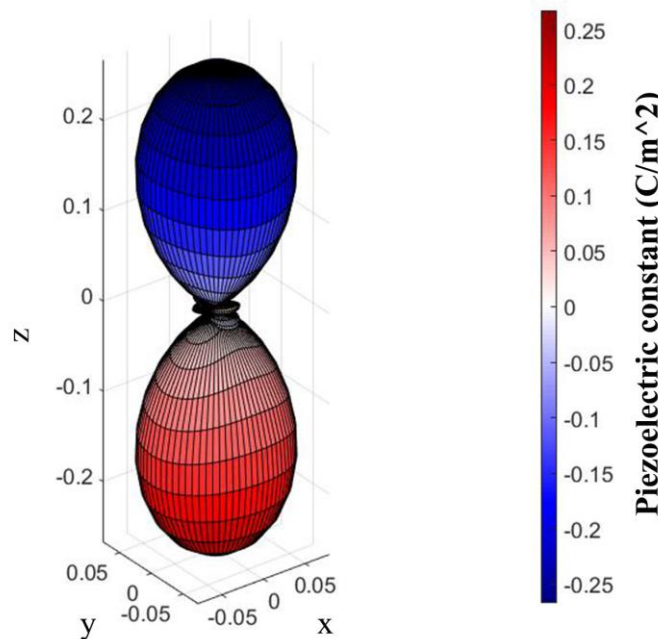


Figure 10. 3D drawing of the piezoelectric tensor for the NbSbO<sub>4</sub> crystal under the LDA approximation. It corresponds to the red (positive) and blue (negative) lobes (Units: C/m<sup>2</sup>).

### 3. Discussion and Conclusion

The structural, elastic, and piezoelectric properties of the orthorhombic NbSbO<sub>4</sub> crystal were calculated by density functional theory. Both GGA and LDA approximations and the ABINIT package program based on density functional theory were used for all calculations. First, structural optimization was performed for the NbSbO<sub>4</sub> crystal under GGA and LDA approximations, and the volume value corresponding to the minimum energy was obtained. Accordingly, the elastic properties of the NbSbO<sub>4</sub> crystal were calculated with the obtained lattice parameters. First, the elastic stiffness tensor and elastic compliance tensor were calculated under different approximations of the crystal.

Voigt Bulk Modulus ( $B_V$ ), Reuss Bulk Modulus ( $B_R$ ), Hill Bulk Modulus ( $B_{VRH}$ ), Voigt Shear Modulus ( $G_V$ ), Reuss Shear Modulus ( $G_R$ ), Hill Shear Modulus ( $G_{VRH}$ ), Young's Modulus for NbSbO<sub>4</sub> crystal ( $E$ ), Poisson Ratio ( $\nu$ ), Coefficient of Elasticity ( $K$ ), Debye temperature ( $\Theta_D$ ), Longitudinal sound wave velocity ( $v_l$ ), Transverse sound wave velocity ( $v_t$ ) and Average sound velocity ( $v_m$ ) were calculated. The data obtained for both approximations were compared. When the elastic properties of the material are examined, the elastic constants calculated with the LDA approximation are generally higher than the GGA approximation. The Debye temperature, known as the temperature at which the highest frequency mode is excited, was obtained under the LDA approximation with a temperature of 345.6 K, which was higher than the GGA approximation. Considering the Poisson ratios calculated under both the GGA and LDA approximations for the NbSbO<sub>4</sub> crystal, it was seen that the crystal was prone to ionic crystal structure under both approximations. Similarly, when the Flexibility Coefficients calculated for the NbSbO<sub>4</sub> crystal were compared under both approximations, it was seen that the NbSbO<sub>4</sub> crystal had a flexible and malleable structure. Finally, the piezoelectric tensor of the NbSbO<sub>4</sub> crystal was calculated. Accordingly, 2D longitudinal surfaces and 3D representation surfaces of the piezoelectric tensor were obtained using MTEX software. The distributions of the upper and lower hemispheres obtained with the piezoelectric tensor calculated under different approximations for the NbSbO<sub>4</sub> crystal were calculated differently under both GGA and LDA approximations. also, when looking at the values, the maximum values of the LDA approximation have higher values than those calculated for the GGA approximation. Similarly, when looking at the minimum values, it was seen that the values calculated for GGA were higher.

The calculations for both the GGA and LDA approximations for the NbSbO<sub>4</sub> crystal were compared. The differences of these two approximations on the material were revealed. I hope it will help future studies for NbSbO<sub>4</sub> crystal.

## References

- Ayyub, P., Multani, M. S., Palkar, V. R., & Vijayaraghavan, R. (1986). Vibrational spectroscopic study of ferroelectric SbNbO<sub>4</sub>, antiferroelectric BiNbO<sub>4</sub>, and their solid solutions. *Physical Review B*, 34(11), 8137. doi:10.1103/PhysRevB.34.8137
- Bachmann, F., Hielscher, R., & Schaeben, H. (2010). Texture analysis with MTEX—free and open-source software toolbox. *Solid State Phenomena*, 160, 63-68. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.160.63
- Bouty, E. (1883). Ueber die aktino-und piezo-elektrischen Eigenschaften des Bergkrystalles und ihre Beziehung zu den thermo-elektrischen (Sur les propriétés actino et piézo-électriques du quartz et leur relation avec ses propriétés pyro-électriques); Abh. der Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, t. XX, p. 459; 1881. *Journal of Physics: Theories and Applications*, 2(1), 89-93. doi:10.1051/jphystap:01883002008901
- Chattopadhyay, S., Ayyub, P., Multani, M., & Pinto, R. (1998). Synthesis of oriented thin films of ferroelectric SbNbO<sub>4</sub> on Si by pulsed laser ablation. *Journal of Applied Physics*, 83(7), 3911-3913. doi:10.1063/1.366625
- Curie, J., & Curie, P. (1880). Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. *Bulletin de Minéralogie*, 3(4), 90-93. doi:10.3406/bulmi.1880
- De Jong, M., Chen, W., Geerlings, H., Asta, M., & Persson, K. A. (2015). A database to enable discovery and design of piezoelectric materials. *Scientific Data*, 2(1), 1-13. doi:10.1038/sdata.2015.53
- Dineva, P., Gross, D., Müller, R., & Rangelov, T. (2014). Piezoelectric materials. In *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials* (pp. 7-32). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-03961-9\_2
- Dulian, P., Piz, M., Filipek, E., & Wiczorek-Ciurowa, K. (2014). Comparative study of phases forming in niobium-antimony oxides system upon high temperature treatment and high-energy ball milling. *Acta Physica Polonica A*, 126(4), 938-942. doi:10.12693/APhysPolA.126.938
- El-Fadl, A. A., Mohamad, G. A., & Yamazaki, T. (2003). Variation of the absorption spectra and optical energy gap with  $\gamma$ -ray irradiation and heat treatment in SbNbO<sub>4</sub> films deposited on MgO and quartz substrates. *Materials Chemistry and Physics*, 80(1), 239-249. doi:10.1016/S0254-0584(02)00464-9

- Fuchs, M., & Scheffler, M. (1999). Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density-functional theory. *Computer Physics Communications*, 119(1), 67-98. doi:10.1016/S0010-4655(98)00201-X
- Fukunaga, O., & Yamaoka, S. (1979). Phase transformations in ABO<sub>4</sub> type compounds under high pressure. *Physics and Chemistry of Minerals*, 5(2), 167-177. doi:10.1007/BF00307551
- Gonze, X., Beuken, J. M., Caracas, R., Detraux, F., Fuchs, M., Rignanese, G. M., ... & Allan, D. C. (2002). First-principles computation of material properties: the ABINIT software project. *Computational Materials Science*, 25(3), 478-492. doi:10.1016/S0927-0256(02)00325-7
- Jain, A., Ong, S. P., Hautier, G., Chen, W., Richards, W. D., Dacek, S., ... & Persson, K. A. (2013). Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation. *APL Materials*, 1(1), 011002. doi:10.1063/1.4812323
- Kim, S. H., Park, S., Lee, C. W., Han, B. S., Seo, S. W., Kim, J. S., Cho, I. S., & Hong, K. S. (2012). Photophysical and photocatalytic water splitting performance of stibiotantalite type-structure compounds, SbMO<sub>4</sub> (M= Nb, Ta). *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(22), 16895-16902. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.08.123
- Knauth, P., & Schwitzgebel, G. (1988). Calorimetric investigations on the SbNbO<sub>4</sub>-SbSbO<sub>4</sub> system. *Journal of Thermal Analysis*, 33(3), 619-623. doi:10.1007/BF02138564
- Knauth, P., & Schwitzgebel, G. (1990). Thermodynamic properties of antimony (III) niobate (V). *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 22(5), 481-485. doi:10.1016/0021-9614(90)90140-L
- Kohn, W., & Sham, L. J. (1965). Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical Review*, 140(4A), A1133. doi:10.1103/PhysRev.140.A1133
- Köster, W., & Franz, H. (1961). Poisson's ratio for metals and alloys. *Metallurgical Reviews*, 6(1), 1-56. doi:10.1179/mtlr.1961.6.1.1
- Mainprice, D., Bachmann, F., Hielscher, R., Schaeben, H., & Lloyd, G. E. (2015). Calculating anisotropic piezoelectric properties from texture data using the MTEX open-source package. *Geological Society, London, Special Publications*, 409(1), 223-249. <https://doi.org/10.1144/SP409.2>
- Mohamed, G. A., Yamazaki, T., Nakatani, N., Yuhara, J., & Morita, K. (1998). Growth and optical properties of SbNbO<sub>4</sub> films. *Ferroelectrics*, 218(1), 199-208. doi:10.1080/00150199808227147
- Mohamad, G. A., El-Fadl, A. A., & Yamazaki, T. (2001). Effect of gamma irradiation and heat treatment on the optical properties of SbNbO<sub>4</sub> ferroelectric thin films. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 154(2), 165-178. doi:10.1080/10420150108214050
- The MathWorks Inc. (2020). MATLAB version: 9.9.0.1 (R2020b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>
- Momma, K., & Izumi, F. (2011). VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *Journal of Applied Crystallography*, 44(6), 1272-1276. doi:10.1107/S0021889811038970
- Monkhorst, H. J., & Pack, J. D. (1976). Special points for Brillouin-zone integrations. *Physical Review B*, 13(12), 5188. doi:10.1103/PhysRevB.13.5188
- Müller, O., & Roy, R. (1973). Phase transitions among the ABX<sub>4</sub> compounds. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 138(1-6), 237-253. doi:10.1524/zkri.1973.138.jg.237
- Newnham, R. E. (2005). *Properties of Materials: Anisotropy, Symmetry, Structure*. Oxford University Press.
- Nye, J. F. (1985). *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*. Oxford University Press.
- Popolitov, V. I., Ivanova, L. A., Stephanovitch, S. Y., Chetchkin, V. V., Lobachev, A. N., & Venetsev, Y. N. (1974). Ferroelectrics abo<sub>4</sub>: Synthesis of single crystals and ceramics; dielectric and nonlinear optical properties. *Ferroelectrics*, 8(1), 519-520. doi:10.1080/00150197408234145
- Popolitov, V. I., Lobachev, A. N., & Peskin, V. F. (1982). Antiferroelectrics, ferroelectrics and pyroelectrics of a stibiotantalite structure. *Ferroelectrics*, 40(1), 9-16. doi:10.1080/00150198208210591

- Pugh, S. F. (1954). XCII. Relations between the elastic moduli and the plastic properties of polycrystalline pure metals. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 45(367), 823-843. doi:10.1080/14786440808520496
- Qu, X. X., & Lévy, F. (1995). Textured ferroelectric SbNbO<sub>4</sub> thin films deposited by ion-beam sputtering. *Ferroelectrics Letters Section*, 20(3-4), 83-88. doi:10.1080/07315179508204287
- Rannev, N. V., Shchedrin, B. M., & Venevtsev, Y. N. (1976). Crystal structure of ferrielectric stibiumniobite SbNbO<sub>4</sub>. *Ferroelectrics*, 13(1), 523-525. doi:10.1080/00150197608236657
- Saritha, D. (2018). Electrochemical reaction of lithium with SbNbO<sub>4</sub>-ReO<sub>3</sub> structure type phase. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 17579-17584. doi:10.1016/j.matpr.2018.06.075
- Shaldin, Y. V. (2002). Spontaneous polarization of Fe-doped SbNbO<sub>4</sub> crystals. *Crystallography Reports*, 47(3), 484-488. doi:10.1134/1.1481939
- Troullier, N., & Martins, J. L. (1991). Efficient pseudopotentials for plane-wave calculations. *Physical Review B*, 43(3), 1993. doi:10.1103/PhysRevB.43.1993



Research Article

**Approximation Properties of a Class of Kantorovich Type Operators Associated with the Charlier Polynomials**

**Kerem GEZER, Mine MENEKŞE YILMAZ\***

Gaziantep University, Science and Arts Faculty, Mathematics Department, 27310, Gaziantep, Türkiye  
Kerem GEZER, ORCID No: 0000-0001-6715-845X, Mine MENEKŞE YILMAZ, ORCID No: 0000-0002-9242-8447

\*Corresponding author e-mail: menekse@gantep.edu.tr

**Article Info**

Received: 11.10.2022  
Accepted: 13.01.2023  
Online August 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1187512](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1187512)

**Keywords**

Charlier Polynomials,  
Kantorovich type operators,  
Uniform convergence,  
Voronovskaya type theorem

**Abstract:** In this paper, we introduce a kind of Charlier polynomial-based Szász-Kantorovich type operator. We begin by using Korovkin's theorem to demonstrate the uniform convergence of these operators. Second, using mathematical techniques like Peetre's  $\mathcal{K}$ -functional notion and the common modulus of the operators, we evaluate the order of convergence of the operators. Third, we use the Voronovskaya type approximation theorem to derive an asymptotic formula for the operator we gave. Finally, we give a numerical example using Maple 2022.

**Charlier Polinomlarıyla İlişkili Kantorovich Tipi Operatörler Sınıfının Yaklaşım Özellikleri**

**Makale Bilgileri**

Geliş: 11.10.2022  
Kabul: 13.01.2023  
Online Ağustos 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1187512](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1187512)

**Anahtar Kelimeler**

Charlier Polinomları,  
Düzgün yakınsaklık  
Kantorovich tipi operatörler,  
Voronovskaya tipi teorem

**Öz:** Bu çalışmada, Charlier polinom tabanlı Szász-Kantorovich tipi bir operatör tanıtıyoruz. Bu operatörlerin düzgün yakınsamasını göstermek için Korovkin teoremini kullanarak başlıyoruz. İkinci olarak, Peetre'ın  $\mathcal{K}$ -fonksiyonel kavramı ve operatörlerin olağan süreklilik modülü gibi matematiksel teknikleri kullanarak, operatörlerin yakınsama oranını değerlendiriyoruz. Üçüncüsü, verdiğimiz operatör için asimptotik bir formül türetmek için Voronovskaya tipi yaklaşım teoremini kullanıyoruz. Son olarak Maple 2022 kullanarak sayısal bir örnek veriyoruz.

**1. Introduction**

Otto Szász (1950) defined the following linear positive operators

$$P_n(u; f) = e^{-ux} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(ux)^k}{k!} f\left(\frac{k}{u}\right), u > 0. \quad (1)$$



He presented a uniform approximation for continuous functions on  $[0, \infty)$ . Several authors presented various types of these operators and gave their approximation properties in some functional spaces (Jakimovski & Leviatan, 1969; Păltănea, 2008; Aral et al., 2014; Atakut & Büyükyazıcı, 2010 and 2016, Ağyüz, 2021; Aslan, 2022; Aslan & Mursaleen, 2022).

Varma & Tasdelen (2012) presented a form of the Szász operators based on Charlier polynomials  $C_k^\alpha(x)$  (Ismail, 2005) having the generating function of the form:

$$e^{-aw}(1+w)^x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^{(a)}(x)w^k}{k!}, a \neq 0, \tag{2}$$

and the explicit form of the Charlier polynomial is

$$C_k^{(a)}(x) = \sum_{n=0}^k \binom{k}{n} \binom{x}{n} n! (-a)^{k-n}. \tag{3}$$

They described a new sequence that involves Charlier polynomials as follows:

$$L_n(f; x, a) = e^{-1} \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{(a-1)nx} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^{(a)}(- (a-1)nx)}{k!} f\left(\frac{k}{n}\right), \tag{4}$$

where  $a > 1$  and  $x \geq 0$ . And also, they gave a Kantorovich-type generalization of the operators  $L_n$ . They obtained some approximation properties and studied the order of approximation for the operators Equation 4. For some articles based on Charlier polynomials, see: Agrawal & İspir (2016); Wafi & Rao (2016); Kajla & Agrawal (2016); Çavdar (2017); Ayık (2018); Ansari et al. (2020); Al-Abied et al. (2021).

Based on Equation 4 for  $n \in \mathbb{N}$ , we define the operators, denoted by  $K_n(f; x)$ , as follows:

**Definition 1** Let  $K_n: C[0, \infty) \rightarrow C[0, \infty)$ . For  $(n \in \mathbb{N})$ ,  $0 \leq \alpha \leq \beta$ ,  $n + \beta \geq 1$  and  $f \in C[0, \infty)$ , the operators  $K_n$  defined by

$$K_n(f; x) = e^{-1} \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{(a-1)nx} (n + \beta) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^{(a)}(- (a-1)nx)}{k!} \int_{\frac{k+\alpha}{n+\beta}}^{\frac{k+\alpha+1}{n+\beta}} f(s)ds, \tag{5}$$

where  $\{C_k^{(a)}\}_{k=0}^{\infty}$  are Charlier polynomials that are positive for  $a > 1$  and  $x \geq 0$ .

The goal of the present study is to establish some approximation properties of the Kantorovich-type operators including Charlier polynomials defined by Equation 5. The rest of this paper is structured as follows:

In the next section, we give some auxiliary lemmas for the operators  $K_n(f; x)$ . In the third section, we investigate the uniform approximation of the sequence  $\{K_n(f; x)\}_{n=0}^{\infty}$ , and then we estimate the order of convergence of the operators  $K_n$  with the help of the usual modulus of continuity and the Peetre’s  $\mathcal{K}$ -functional. In the fourth section, we give a Voronovskaya-type theorem for the operators given in Equation 5.

## 2. Material and Methods Preliminaries

In this section, we give the following lemmas which are used in the theorems.

**Lemma 1** For  $a > 1$  and the operators  $K_n(f; x)$ , we have the following equalities:

$$K_n(e_0; x) = 1, \tag{6}$$

$$K_n(e_1; x) = \frac{n}{n + \beta} x + \frac{2\alpha + 3}{2(n + \beta)}, \tag{7}$$

$$K_n(e_2; x) = \frac{n^2}{(n + \beta)^2} x^2 + \frac{nx}{(n + \beta)^2} \left( \frac{4\alpha - 3}{a - 1} + 2\alpha \right) + \frac{3\alpha^2 + 9\alpha + 10}{3(n + \beta)^2}, \tag{8}$$

$$\begin{aligned} K_n(e_3; x) = & \frac{n^3 x^3}{(n + \beta)^3} + \frac{n^2 x^2}{(n + \beta)^3} \left( \frac{15}{2} + \frac{3}{a - 1} + 3\alpha \right) \\ & + \frac{nx}{(n + \beta)^3} \left( \frac{31}{2} + \frac{15 + 6\alpha}{2(a - 1)} + \frac{2}{(a - 1)^2} + 3\alpha^2 + 12\alpha \right) \\ & + \frac{2\alpha^3 + 18\alpha^2 + 20\alpha + 37}{4(n + \beta)^3} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} K_n(e_4; x) = & \frac{n^4 x^4}{(n + \beta)^4} + \frac{n^3 x^3}{(n + \beta)^4} \left[ 12 + \frac{6}{a - 1} + 4\alpha \right] \\ & + \frac{n^2 x^2}{(n + \beta)^4} \left[ 46 + \frac{36 + 12\alpha}{a - 1} + \frac{11}{(a - 1)^2} + 30\alpha + 6\alpha^2 \right] \\ & + \frac{nx}{(n + \beta)^4} \left[ 64 + \frac{46 + 30\alpha + 6\alpha^2}{a - 1} + \frac{24 + 8\alpha}{(a - 1)^2} + \frac{6}{(a - 1)^3} + 4\alpha^3 \right. \\ & \left. + 24\alpha^2 + 62\alpha \right] + \frac{5\alpha^4 + 30\alpha^3 + 100\alpha^2 + 185\alpha + 151}{5(n + \beta)^4}, \end{aligned} \tag{10}$$

where  $e_m(s) = s^m \in C[0, \infty)$ ,  $m = 0, 1, 2, 3, 4$ .

**Proof** One shall obtain the desired results by using the generating function of Charlier polynomials directly in the equations.

$$\begin{aligned} K_n(e_0; x) = & e^{-1} \left( 1 - \frac{1}{a} \right)^{(a-1)nx} (n + \beta) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^{(a)}(- (a - 1)nx)}{k!} \int_{\frac{k+\alpha}{n+\beta}}^{\frac{k+\alpha+1}{n+\beta}} ds \\ = & e^{-1} \left( 1 - \frac{1}{a} \right)^{(a-1)nx} (n + \beta) e \left( 1 - \frac{1}{a} \right)^{-(a-1)nx} \frac{1}{n + \beta} = 1 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 K_n(e_1; x) &= e^{-1} \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{(a-1)nx} (n + \beta) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^{(a)}(- (a - 1)nx)}{k!} \int_{\frac{k+\alpha}{n+\beta}}^{\frac{k+\alpha+1}{n+\beta}} s ds \\
 &= e^{-1} \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{(a-1)nx} (n + \beta) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^{(a)}(- (a - 1)nx)}{k!} \left[ \frac{k}{(n + \beta)^2} + \frac{2\alpha + 1}{2(n + \beta)^2} \right] \\
 &= e^{-1} \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{(a-1)nx} (n + \beta) e \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{-(a-1)nx} (nx + 1) \frac{1}{(n + \beta)^2} \\
 &\quad + e^{-1} \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{(a-1)nx} (n + \beta) e \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{-(a-1)nx} \frac{2\alpha + 1}{2(n + \beta)^2} \\
 &= \frac{n}{n + \beta} x + \frac{2\alpha + 1}{2(n + \beta)}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

We may similarly prove other cases.

**Lemma 2** For  $n \in \mathbb{N}$ , the central moments for the operators  $K_n(f; x)$  are given as follows:

$$K_n(e_1 - x; x) = \left(\frac{n}{n + \beta} - 1\right) x + \frac{2\alpha + 3}{2(n + \beta)} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 K_n((e_1 - x)^2; x) &= x^2 \left(\frac{n}{n + \beta} - 1\right)^2 + x \left(\frac{n}{(n + \beta)^2} \left(\frac{4a - 3}{a - 1} + 2\alpha\right) - \frac{2\alpha + 3}{(n + \beta)}\right) \\
 &\quad + \frac{3\alpha^2 + 9\alpha + 10}{3(n + \beta)^2}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 K_n((e_1 - x)^4; x) &= \left(\frac{n}{n + \beta} - 1\right)^4 x^4 + \frac{n^3}{(n + \beta)^4} \left(\frac{12a - 6}{a - 1} + 4\alpha\right) x^3 \\
 &+ \left(-\frac{4n^2}{(n + \beta)^3} \left(\frac{15a - 9}{2a - 2} + 3\alpha\right) + \frac{6n}{(n + \beta)^2} \left(\frac{4a - 3}{a - 1} + 2\alpha\right) - \frac{4\alpha + 6}{n + \beta}\right) x^3 \\
 &\quad + \left(\frac{n^2}{(n + \beta)^4} \left[46 + \frac{36 + 12\alpha}{a - 1} + \frac{11}{(a - 1)^2} + 30\alpha + 6\alpha^2\right] \right. \\
 &\quad \left. - \frac{4n}{(n + \beta)^3} \left(\frac{31}{2} + \frac{15 + 6\alpha}{2(a - 1)} + \frac{2}{(a - 1)^2} + 3\alpha^2 + 12\alpha\right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{6\alpha^2 + 18\alpha + 20}{(n + \beta)^2}\right) x^2 \\
 &+ \left(\frac{n}{(n + \beta)^4} \left[64 + \frac{46 + 30\alpha + 6\alpha^2}{a - 1} + \frac{24 + 8\alpha}{(a - 1)^2} + \frac{6}{(a - 1)^3} + 4\alpha^3 + 24\alpha^2 + 62\alpha\right] \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2\alpha^3 + 18\alpha^2 + 20\alpha + 37}{4(n + \beta)^3}\right) x \\
 &\quad + \frac{5\alpha^4 + 30\alpha^3 + 100\alpha^2 + 185\alpha + 151}{5(n + \beta)^4}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

**Proof** Due to the linearity property of the operators  $K_n$  provides the following equality:

$$K_n((e_1 - x)^4; x) = K_n(e_4; x) - 4x K_n(e_3; x) + 6x^2 K_n(e_2; x) - 4x^3 K_n(e_1; x) + x^4 K_n(e_0; x). \tag{16}$$

Using Equation 6-10, we get Equation 13. Similarly, using the linearity property of  $K_n$ , we obtain Equation 14 and Equation 15.

**Theorem 1** Let  $E := \{f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}, |f(x)| \leq ce^{bx}, c \in \mathbb{R}, b \in \mathbb{R}^+\}$ .  
 If  $f \in C[0, \infty) \cap E$ , then

$$\lim_{n \rightarrow \infty} K_n(f; x) = f(x), \tag{17}$$

and the operators  $K_n$  converge uniformly in each compact subset of  $[0, \infty)$ .

**Proof** Considering Lemma 1, the following holds uniformly in each compact subinterval of  $[0, \infty)$ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|K_n(e_m; x) - x^m\| = 0 \text{ for } m=0,1,2. \tag{18}$$

According to Korovkin’s theorem (Korovkin, 1953), we obtain the desired result.

### 3. Results

#### 3.1. Order of approximation

In this section, we establish the order of approximation of the operators  $K_n$  to  $f$  with the aid of the modulus of continuity and Peetre’s  $\mathcal{K}$ -functional. We begin this section by defining the concepts we will use in the theorems.

Let  $\tilde{C}[0, \infty)$  be the space of uniformly continuous functions on  $[0, \infty)$ . For  $\delta > 0$ , the usual modulus of continuity  $\omega(f; \delta): [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  defined by

$$\omega(f; \delta) := \sup_{\substack{x, y \in [0, \infty) \\ |x - y| \leq \delta}} |f(x) - f(y)|, \tag{19}$$

with the following properties

$$|f(x) - f(y)| \leq \omega(f; \delta) \left(1 + \frac{|x - y|}{\delta}\right). \tag{20}$$

and  $\lambda > 0$ ,

$$\omega(f; \lambda\delta) \leq (1 + \lambda)\omega(f; \delta) \leq (1 + \lambda^2)\omega(f; \delta). \tag{21}$$

(Barbosu, 2004).

Let  $C_B[0, \infty)$  be the space of real-valued functions defined on  $[0, \infty)$  which are bounded and uniformly continuous with the norm  $\|f\|_{C_B} = \sup_{x \in [0, \infty)} |f(x)|$ .

Peetre’s  $\mathcal{K}$ -functional of the function  $f \in C_B[0, \infty)$  is defined as

$$\mathcal{K}(f; \delta) := \inf_{g \in C_B^2[0, \infty)} \left\{ \|f - g\|_{C_B} + \delta \|g\|_{C_B^2} \right\}, \tag{22}$$

where  $C_B^2[0, \infty) := \{g \in C_B[0, \infty) : g', g'' \in C_B[0, \infty)\}$  with the norm

$$\|g\|_{C_B^2} := \|g\|_{C_B} + \|g'\|_{C_B} + \|g''\|_{C_B}. \tag{23}$$

**Theorem 2** If  $f \in \tilde{C}[0, \infty) \cap E$ , then

$$|K_n(s, x) - f(x)| \leq 2\omega(f; \sqrt{K_n((e_1 - x)^2; x)}). \tag{24}$$

**Proof** Assume that  $I_n := |K_n(s, x) - f(x)|$ . We know that  $(1 - \frac{1}{a})^{(a-1)nx} \geq 0$  and  $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^{(a)}(- (a-1)nx)}{k!} \geq 0$ , and also from Lemma 1, we have  $K_n(1; x) = 1$ . The following inequality is clear from these facts:

$$I_n \leq (n + \beta)e^{-1} \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{(a-1)nx} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^{(a)}(- (a-1)nx)}{k!} \int_{\frac{k+\alpha}{n+\beta}}^{\frac{k+\alpha+1}{n+\beta}} |f(s) - f(x)| ds.$$

Using Equation 20 and Equation 21, we get the following:

$$|f(s) - f(x)| \leq \omega(f; \delta^{-1}|s - x|) \leq (1 + \delta^{-2}(s - x)^2)\omega(f; \delta). \tag{25}$$

Using Lemma 2, we obtained the following form:

$$I_n \leq e^{-1} \left(1 - \frac{1}{a}\right)^{(a-1)nx} \left( n + \beta \right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{C_k^{(a)}(- (a-1)nx)}{k!} \int_{\frac{k+\alpha}{n+\beta}}^{\frac{k+\alpha+1}{n+\beta}} \left(1 + \frac{|s - x|^2}{\delta^2}\right) \omega(f; \delta) ds \tag{26}$$

$$I_n \leq \{K_n(e_0; x) + \delta^{-2}K_n((e_1 - x)^2; x)\} \omega(f; \delta) \leq \{1 + \delta^{-2}K_n((e_1 - x)^2; x)\} \omega(f; \delta), \tag{27}$$

for any  $\delta > 0$  and each  $x \in [0, \infty)$ .

Since  $K_n((e_1 - x)^2; x) \geq 0$  for each  $x \in [0, \infty)$ , we may choose  $\delta := \sqrt{K_n((e_1 - x)^2; x)}$  then we have the desired result.

We give the following estimation theorem involving Peetre’s  $\mathcal{K}$ -functional, similar to the theorem in [Sucu \(2022\)](#).

**Theorem 3** If  $f \in C_B^2[0, \infty)$ , then

$$|K_n(f; x) - f(x)| \leq 2\mathcal{K}(x; \vartheta_n(x)), \tag{28}$$

where  $\vartheta_n(x) := \frac{1}{2}\{K_n(e_1 - x; x) + K_n((e_1 - x)^2; x)\}$  and  $\mathcal{K}$  is the Peetre’s  $\mathcal{K}$ -functional of  $f$ .



**Proof** From the Taylor formula of  $g$ , the linearity property of operators  $K_n$  and Lemma 1, we may write the following:

$$K_n(g; x) - g(x) = g'(x)K_n(s - x; x) + \frac{g''(\eta)}{2}K_n((s - x)^2; x), \quad \eta \in (x, s). \tag{29}$$

Also, we may reach the following inequality using Equation 23 in Equation 29:

$$\begin{aligned} |K_n(g; x) - g(x)| &\leq \|g'\|_{C_B} |K_n(e_1 - x; x)| + \frac{1}{2} \|g''\|_{C_B} |K_n((e_1 - x)^2; x)| \\ &\leq \|g\|_{C_B^2} \left\{ |K_n(e_1 - x; x)| + \frac{1}{2} |K_n((e_1 - x)^2; x)| \right\} \\ &\leq \|g\|_{C_B^2} \vartheta_n(x). \end{aligned} \tag{30}$$

By applying Equation 30, we get the following:

$$\begin{aligned} |K_n(f; x) - f(x)| &\leq |K_n(f - g; x)| + |K_n(g; x) - g(x)| + |f(x) - g(x)| \\ &\leq 2\|f - g\|_{C_B} + |K_n(g; x) - g(x)| \\ &\leq 2\{\|f - g\|_{C_B} + \|g\|_{C_B^2} \vartheta(x)\}. \end{aligned} \tag{31}$$

If we take the infimum over all  $g \in C_B^2[0, \infty)$ , Equation 31 implies the following result:

$$|K_n(f; x) - f(x)| \leq 2\mathcal{K}(x; \vartheta_n(x)) \tag{32}$$

which finishes the proof.

### 3.2. Voronovskaya-type theorem

**Lemma 3** For fixed  $x_0 \in [0, \infty)$ , we have

$$\lim_{n \rightarrow \infty} nK_n(e_1 - x_0; x) = -\beta x_0 + \frac{2\alpha + 3}{2}, \tag{33}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} nK_n((e_1 - x_0)^2; x) = x_0 \left( 1 + \frac{1}{a - 1} \right). \tag{34}$$

**Proof** Applying Equation 13 and Equation 14, the desired result is achieved.

**Lemma 4** For each fixed  $x_0 \in [0, \infty)$ , there is a positive constant  $M(x_0)$ , depending only on  $x_0$  such that and

$$K_n((e_1 - x_0)^4; x_0) \leq M(x_0) \frac{1}{(n + \beta)^2}, \tag{35}$$

for all  $n \in \mathbb{N}$ .

**Proof** By Equation 15, we can find a boundary for  $K_n((s - x_0)^4; x_0)$ .

$$\begin{aligned}
 K_n((s - x_0)^4; x_0) &\leq \left(\frac{1}{n + \beta} - 1\right)^4 x_0^4 + \frac{1}{(n + \beta)^2} \left\{4 + \frac{6}{a - 1} + \frac{11}{(a - 1)^2}\right\} x_0^2 \\
 &+ \frac{1}{(n + \beta)^3} \left\{64 + \frac{46 + 30\alpha + 6\alpha^2}{a - 1} + \frac{24 + 8\alpha}{(a - 1)^2} + \frac{6}{(a - 1)^3} + 4\alpha^3 + 24\alpha^2 + 62\alpha \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2\alpha^3 + 18\alpha^2 + 20\alpha + 37}{4(n + \beta)^3}\right\} x_0 \\
 &\quad + \frac{1}{(n + \beta)^4} \left\{\frac{5\alpha^4 + 30\alpha^3 + 100\alpha^2 + 185\alpha + 151}{5}\right\} \\
 &\leq \frac{1}{(n + \beta)^2} \left[ x_0^4 + \left(4 + \frac{6}{a - 1} + \frac{11}{(a - 1)^2}\right) x_0^2 \right. \\
 &\quad + \left(64 + \frac{46 + 30\alpha + 6\alpha^2}{a - 1} + \frac{24 + 8\alpha}{(a - 1)^2} + \frac{6}{(a - 1)^3} + 4\alpha^3 + 24\alpha^2 \right. \\
 &\quad \left. + 62\alpha - \frac{2\alpha^3 + 18\alpha^2 + 20\alpha + 37}{4}\right) x_0 \\
 &\quad \left. + \frac{5\alpha^4 + 30\alpha^3 + 100\alpha^2 + 185\alpha + 151}{5} \right] \\
 &\leq \frac{1}{(n + \beta)^2} M(x_0).
 \end{aligned} \tag{36}$$

**Theorem 4** If  $f \in C_B^2[0, \infty)$ , then

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n[K_n(f; x) - f(x)] = \frac{x}{2} \left(\frac{a}{a - 1}\right) f''(x) + f'(x) \left(-\beta x + \frac{2\alpha + 3}{2}\right), \tag{37}$$

for every fixed  $x \in [0, \infty)$ .

**Proof** For a fixed point  $x_0 \in [0, \infty)$ , we write the Taylor formula as follows:

$$f(s) = f(x_0) + (s - x_0)f'(x_0) + \frac{1}{2}(s - x_0)^2 f''(x_0) + g(s; x_0)(s - x_0)^2, \tag{38}$$

where  $g(s; x_0)$  is the Peano form of the remainder and  $g(\cdot; x_0) \in C[0, \infty)$  with  $\lim_{s \rightarrow x_0} g(s; x_0) = 0$ .

By Equation 3 and Equation 19, we get

$$\begin{aligned}
 n[K_n(f; x_0) - f(x_0)] &= f'(x_0)nK_n(e_1 - x_0; x_0) + \frac{1}{2}f''(x_0)nK_n((e_1 - x_0)^2; x_0) \\
 &\quad + nK_n(g(s; x_0)(e_1 - x_0)^2; x_0),
 \end{aligned} \tag{39}$$

for every  $n \in \mathbb{N}$ .

By applying the Cauchy-Schwarz inequality to the third term on the right-hand side of Equation 39, we have

$$nK_n(g(s; x_0)(e_1 - x_0)^2; x_0) \leq \{K_n(g^2(s; x_0); x_0)\}^{\frac{1}{2}}\{n^2K_n((e_1 - x_0)^4; x_0)\}^{\frac{1}{2}}. \tag{40}$$

The function  $h(s, x_0) = g^2(s; x_0)$ ,  $s \geq 0$ , we get  $h(s, x_0) \in C[0, \infty)$  and  $\lim_{s \rightarrow x_0} h(s, x_0) = 0$ .

Hence

$$\lim_{s \rightarrow x_0} K_n(g^2(s; x_0); x_0) = \lim_{s \rightarrow x_0} K_n(h(s; x_0); x_0) = \lim_{s \rightarrow x_0} h(s; x_0) = 0. \tag{41}$$

uniformly concerning  $x_0 \in [0, \infty)$ .

Using Equation 35 in Equation 40, we get

$$nK_n(g(s; x_0)(e_1 - x_0)^2; x_0) \leq (K_n(g^2(s; x_0); x_0))^{\frac{1}{2}} \left( n^2 M(x_0) \frac{1}{(n + \beta)^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \tag{42}$$

It results that  $\lim_{n \rightarrow \infty} nK_n(g(s; x_0)(e_1 - x_0)^2; x_0) = 0$ .

Finally, by Equation 33 and Equation 34, we have the desired result as follows:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n(K_n(f; x_0) - f(x_0)) = \frac{x_0}{2} \left( 1 + \frac{1}{a - 1} \right) f''(x_0) + \left( -\beta x_0 + \frac{2\alpha + 3}{2} \right) f'(x_0). \tag{43}$$

### 3.3. Numerical example

In this part, we support our results giving an example with the help of the modulus of continuity,  $\omega(f; \delta)$ , by using Maple 2022.

**Example 5** The approximation of  $K_n$  to  $f(x) = \frac{x^2}{\sqrt{1+x^2}}$  on  $[0, \infty)$  for fixed  $\alpha = 1, \beta = 1, a = 2$  is shown in Table 1. Let  $E_n := |K_n(f; x) - f(x)|$ .

Table 1. The error estimation of  $f(x) = \frac{x^2}{\sqrt{1+x^2}}$  using  $\omega(f; \delta)$

$n$	$E_n$
$10^2$	0.0574922114
$10^3$	0.0064708796
$10^4$	0.0011087936
$10^5$	0.0003054410
$10^6$	0.0000950418
$10^7$	0.0000300062

When we examine the Table 1, we notice that the approximation errors of the operators  $K_n$  decrease as  $n$  increases.

### 4. Discussion and Conclusion

In the article by [Varma & Tasdelen \(2012\)](#), the positive linear operator was defined using Charlier polynomials under certain conditions. With the idea of this study, we have defined a new operator based on Charlier polynomials and proved the uniform convergence of these operators with a Korovkin-type approximation. We have used the usual modulus of continuity, Petree’s  $\mathcal{K}$ -functional to estimate the order of the convergence by operators  $K_n$ . We have obtained an asymptotic formula for the operators  $K_n$ . Finally, we have obtained error estimations for operators  $K_n$  with the help of the modulus of continuity  $\omega(f; \delta)$  and then we have presented the numerical results via the table.

For further studies, one may obtain the order of convergence of these operators in terms of the modulus of smoothness in weighted spaces. In addition, the  $q$  analogue and convergence properties of these operators can also be a subject of study.

### Acknowledgements

Some parts of this paper have been presented at the 4<sup>th</sup> International Conference on Pure and Applied Mathematics ICPAM-VAN 2022 June 22-23, 2022.

### References

- Agrawal, P. N., & İspir, N. (2016). Degree of approximation for bivariate Chlodowsky–Szász–Charlier type operators. *Results in Mathematics*, 69(3-4), 369-385. doi:10.1007/s00025-015-0495-6
- Ağyüz, E. (2021). On the convergence properties of Kantorovich-Szasz type operators involving tangent polynomials. *Adiyaman University Journal of Science*, 11(2), 244-252. doi:10.37094/adyujsci.905311
- Al-Abied, A. A. H., Mursaleen, A. M., & Mursaleen, M. (2021). Szász type operators involving Charlier polynomials and approximation properties. *Filomat*, 35(15), 5149-5159. doi:10.2298/FIL2115149A
- Ansari, K. J., Mursaleen, M., Shareef Kp, M., & Ghouse, M. (2020). Approximation by modified Kantorovich–Szász type operators involving Charlier polynomials. *Advances in Difference Equations*, 2020, 192. doi:10.1186/s13662-020-02645-6
- Aral, A., Inoan, D., & Raşa, I. (2014). On the generalized Szász–Mirakjan operators. *Results in Mathematics*, 65 (3), 441-452. doi:10.1007/s00025-013-0356-0
- Aslan, R. (2022). On a Stancu form Szász–Mirakjan–Kantorovich operators based on shape parameter  $\lambda$ . *Advanced Studies: Euro-Tbilisi Mathematical Journal*, 15(1), 151-166. doi:10.32513/asetmj/19322008210
- Aslan, R., & Mursaleen, M. (2022). Approximation by bivariate Chlodowsky type Szász–Durrmeyer operators and associated GBS operators on weighted spaces. *Journal of Inequalities and Applications*, 2022(1), 1-19. doi:10.1186/s13660-022-02763-7
- Atakut, Ç., & Büyükyazıcı, İ. (2010). Stancu type generalization of the Favard– Szász operators. *Applied Mathematics Letters*, 23(12), 1479-1482. doi:10.1016/j.aml.2010.08.017
- Atakut, Ç., & Büyükyazıcı, İ. (2016). Approximation by Kantorovich-Szasz type operators based on Brenke type polynomials. *Numerical Functional Analysis and Optimization*, 37(12), 1488-1502. doi:10.1080/01630563.2016.1216447
- Ayık, A. (2018). *Charlier polinomlarını içeren genelleştirilmiş Szász operatörlerinin Kantorovich tipi genelleştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Barbosu, D. (2004). Kantorovich-Stancu type operators. *Journal of Inequalities in Pure and Applied Mathematics*, 5(3), 1-6.
- Çavdar, B. (2017). *Szász-Charlier tipi operatörlerin gama tipi genelleştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Ismail, M. E. H. (2005). *Classical and Quantum Orthogonal Polynomials in One Variable* (Encyclopedia of Mathematics and its Applications). Cambridge, UK: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107325982
- Jakimovski, A., & Leviatan, D. (1969). Generalized Szász operators for the approximation in the infinite interval. *Mathematica (Cluj)*, 11(34), 97-103.
- Kajla, A. & Agrawal, P. N. (2016). Szász-Kantorovich type operators based on Charlier polynomials. *Kyungpook Mathematical Journal*, 56(3), 877-897. doi:10.5666/kmj.2016.56.3.877
- Korovkin, P. P. (1953). On convergence of linear positive operators in the space of continuous functions (Russian). *Doklady Akademii Nauk SSSR (NS)*, 90, 961–964.
- Păltănea, R. (2008). Modified Szász–Mirakjan operators of integral form. *Carpathian Journal of Mathematics*, 24(3), 378-385.
- Szasz, O. (1950). Generalization of S. Bernstein’s polynomials to the infinite interval. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 45(3), 239-245.

- Sucu, S. (2022). Stancu type operators including generalized Brenke polynomials. *Filomat*, 36(7), 2381-2389. doi:[10.2298/FIL2207381S](https://doi.org/10.2298/FIL2207381S)
- Varma, S., & Taşdelen, F. (2012). Szász type operators involving Charlier polynomials. *Mathematical and Computer Modelling*, 56(5-6), 118-122. doi:[10.1016/j.mcm.2011.12.017](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.12.017)
- Wafi, A., & Rao, N. (2016). A generalization of Szász-type operators which preserves constant and quadratic test functions. *Cogent Mathematics*, 3(1), 1227023. doi:[10.1080/23311835.2016.1227023](https://doi.org/10.1080/23311835.2016.1227023)





Research Article

**A Block Conjugate Gradient Method for Quaternion Linear Systems #**

**Sinem ŞİMŞEK\*, Ayça KÖRÜKÇÜ**

Kırklareli University, Faculty of Art and Sciences, Department of Mathematics, 39100, Kırklareli, Türkiye  
Sinem ŞİMŞEK, ORCID No: 0000-0001-5893-7080, Ayça KÖRÜKÇÜ, ORCID No: 0000-0002-0332-2107

\*Corresponding author e-mail: sinem.simsek@klu.edu.tr

**Article Info**

Received: 31.08.2022  
Accepted: 23.01.2023  
Online August.2023

DOI:10.53433/yyufbed.1168844

**Keywords**

Block conjugate gradient method,  
Krylov subspace,  
Linear quaternion systems

**Abstract:** This study aims at the simultaneous solution of several quaternion linear systems with the same Hermitian and positive definite coefficient matrix by employing the conjugate gradient method. We consider the setting when the quaternion Hermitian positive definite coefficient matrix at hand is very large so that direct methods are not applicable. In the study, we first transform linear quaternion systems into real linear systems. The transformed real linear systems have special structure due to the fact that they are real representations of quaternion systems. Benefitting from the special structure, we further reduce the size of these linear systems. Then a block conjugate gradient method is applied to the resulting reduced real linear systems. The solution obtained after applying the conjugate gradient method is a real representation of the solution of the original quaternion problem. Thus, a conversion of this real solution to the quaternion setting is performed in the end.

**Kuaterniyon Lineer Sistemler için Blok Eşlenik Gradyan Metot**

**Makale Bilgileri**

Geliş: 31.08.2022  
Kabul: 23.01.2023  
Online Ağustos.2023

DOI:10.53433/yyufbed.1168844

**Anahtar Kelimeler**

Blok eşlenik gradyan metot,  
Krylov altuzay,  
Lineer kuaterniyon sistemler

**Öz:** Bu çalışmada katsayılar matrisi aynı ve Hermitian, pozitif tanımlı olan bir takım lineer kuaterniyon sistemlerinin eşlenik gradyan metodu kullanılarak eş zamanlı çözümü amaçlanmıştır. Kuaterniyon Hermitian pozitif tanımlı katsayılar matrisinin boyutunun çok büyük olması durumunda, lineer sistemlerin çözümü için direk metotlar kullanıma uygun değildir. Çalışmada, öncelikle lineer kuaterniyon sistemlerini reel lineer sistemlere dönüştürdük. Dönüştürülen reel lineer sistemler, kuaterniyon sistemlerin reel temsilleri olmalarından ötürü özel yapıya sahiptirler. Bu özel yapıyı kullanarak reel lineer sistemlerin boyutlarını indirdik. Daha sonra elde edilen indirgenmiş reel sistemlere yinelemeli bir yöntem olan blok eşlenik gradyan metodunu uyguladık. Blok eşlenik gradyan metodu uygulandıktan sonra elde edilen çözümler, orijinal kuaterniyon lineer sistemlerinin çözümlerinin bir reel temsidir. Son olarak bu reel çözümleri orijinal sistemin kuaterniyon çözümlerine dönüştürdük.

**1. Introduction**

Quaternions have important applications in quantum mechanics, image processing, and kinematics (Rodman, 2014; Wei et al., 2018). More specifically, they are useful in the theory of quantum mechanics for unifying fundamental forces concerning elementary particles (Adler, 1995). Additionally, quaternions are used to represent color video signals so as to retain correlation between the three channels of red, green, blue. Therefore, they have been widely employed in color imaging and color

# This paper is based on parts of the M.S. thesis of Ayça KÖRÜKÇÜ conducted under the supervision of Sinem ŞİMŞEK

videos in the literature (Sangwine, 1996; He et al., 2023). They are also suitable for describing translations, rotations of a rigid body (Arena et al., 1998; Caccavale et al., 1999). Use of quaternions in such applications stimulated interest into quaternions. On the other side, linear systems over complex numbers or quaternions are among the most common problems encountered in scientific computing. They usually arise from discretization of models for solving physical problems, linearization of nonlinear equations or problems that involve obtaining the least-squares estimates of the parameters in linear statistical models (Wendland, 2018). In this work, we focus on the solution of Hermitian positive definite linear systems over quaternions in the large-scale setting when there are many unknowns and equations. In particular, for such quaternion systems, we describe a block conjugate gradient method, an iterative subspace approach based on projections to Krylov subspaces exploiting Hermitian positive definiteness of the systems.

The skew-field  $\mathbb{H}$  of quaternions is a four-dimensional algebra over the real algebra  $\mathbb{R}$  generated by the basis  $\{1, i, j, k\}$  with the multiplication rules  $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ ,  $ij = -ji = k$ . A quaternion number  $a$  can be expressed as

$$a = a_0 + a_1i + a_2j + a_3k, \tag{1}$$

where  $a_0, a_1, a_2$  and  $a_3$  are real numbers, and the modulus of  $a$  is defined as  $|a| = \sqrt{\sum_{l=0}^3 a_l^2}$ . Clearly, the multiplication of two quaternion scalars is non-commutative. Denoting by  $\mathbb{H}_{m \times n}$  the set of all  $m \times n$  matrices with quaternion entries, a system of quaternion linear equations can be represented as

$$Ax = b, \tag{2}$$

where  $A \in \mathbb{H}_{m \times n}$  is a known matrix,  $b \in \mathbb{H}_{n \times 1}$  is a known vector, and  $x \in \mathbb{H}_{n \times 1}$  is the unknown vector. Iterative methods are often preferred for solving large-scale sparse linear systems. One family of iterative methods that include most widely used techniques to solve linear systems today is Krylov subspace methods, all of which seek the solution of the original problem in a lower-dimensional (Krylov) subspace. The solution of the linear system in Equation (2) over the field of real and complex fields (when  $A$  is a real and complex matrix,  $b$  and the unknown  $x$  are real and complex vectors) by Krylov subspace methods has been studied extensively. However, very few studies can be found in the literature on the quaternion linear system in Equation (2). The notable studies on the quaternion linear systems based on Krylov subspaces are as follows. Jia and Ng have developed the quaternion generalized minimum residual method (QGMRES) for solving the quaternion linear system in Equation (2) (Jia & Ng, 2021). Opfer has investigated the conjugate gradient algorithm based on Krylov subspaces for the quaternion linear systems when the coefficient matrix is a Hermitian positive definite matrix (Opfer, 2005).

Let us consider the linear systems

$$Ax_i = b_i, i = 1, 2, \dots, s, \tag{3}$$

for a given Hermitian positive definite matrix  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$ , given vectors  $b_i \in \mathbb{H}_{n \times 1}$ , and unknown vectors  $x_i \in \mathbb{H}_{n \times 1}$ . We can solve these linear systems simultaneously instead of solving them separately (O’Leary, 1980). By arranging the right-hand sides and the corresponding solutions in the matrices

$$B := [b_1|b_2| \dots |b_s] \in \mathbb{H}_{n \times s} \text{ and } X := [x_1|x_2| \dots |x_s] \in \mathbb{H}_{n \times s} \tag{4}$$

the linear systems in Equation (3) can be combined into

$$AX = B. \tag{5}$$

More formally, in this work, we describe a block conjugate gradient method to solve the quaternion matrix equation in Equation (5). A block conjugate gradient method for  $AX = B$  has advantages over

applying the conjugate gradient method separately to the  $s$  quaternion linear systems in Equation (3). Most notably, the solutions for all right-hand sides are estimated simultaneously. This may reduce the dimension of the Krylov subspace, and, as a result, the number of matrix-vector multiplications as well as orthogonalization costs to compute the solutions to a prescribed accuracy. Consequently, a block conjugate gradient method often results in not only computational efficiency but also a decrease in memory storage requirements (Feng et al., 1995; Ji & Li, 2017).

This paper is organized as follows. In Section 2, we first recall the preliminaries for quaternion matrices and properties of the real counterparts of quaternion matrices. The proposed approach for the solution of the matrix equation in Equation (5) is described in Section 2.2. In the proposed approach, we transform the original quaternion matrix equation into a real matrix equation by using the real representation of a quaternion matrix. Then, by exploiting the special structures of the real representations of quaternion matrices, we further reduce the sizes of the matrices involved in the real matrix equation. Subsequently, a block conjugate gradient method is applied to the resulting real matrix equation. The solution of the original quaternion matrix equation can be formed from the solution of the real matrix equation by a simple transformation. Thus in the end we apply this transformation to the solution of the real matrix equation retrieved from the block conjugate gradient method to obtain the solution of the original quaternion matrix equation. In Section 3, we confirm that the proposed approach converges to the solution as expected from a conjugate gradient method on two numerical examples. In particular, we illustrate on these examples how quickly the residuals decay depends on the number of clusters of the eigenvalues of the coefficient matrix. We conclude in Section 4 with a summary of our findings and point out future research directions.

## 2. Material and Methods

In this section, we first briefly give the necessary background on quaternion matrices, their real representations, spectral properties, and spell out the real counterpart of the quaternion matrix equation in Equation (5) in Section 2.1. Then, the proposed approach for the iterative solution of the quaternion matrix equation in Equation (5) based on a block conjugate gradient method is described in Section 2.2.

### 2.1. Background

A quaternion matrix  $A \in \mathbb{H}_{m \times n}$  can be written as a sum of four real matrices in the form

$$A = A_0 + A_1i + A_2j + A_3k, \tag{6}$$

where  $A_0, A_1, A_2, A_3 \in \mathbb{R}_{m \times n}$ . The conjugate and conjugate transpose of a quaternion matrix  $A$  is defined as  $\bar{A} = A_0 - A_1i - A_2j - A_3k$  and  $A^* = A_0^T - A_1^T i - A_2^T j - A_3^T k$ , respectively. Moreover, a matrix  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$  is called invertible, if there exist a matrix  $A^{-1} \in \mathbb{H}_{n \times n}$  satisfying  $AA^{-1} = A^{-1}A = I$ . For a matrix  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$ , if  $A = A^*$ , then  $A$  is called a Hermitian matrix. A Hermitian quaternion matrix  $A$  is called positive definite if and only if  $x^*Ax > 0$  for  $\forall x \in \mathbb{H}_{n \times 1} \setminus \{0\}$ . The 2-norm of  $x \in \mathbb{H}_{n \times 1}$  and the Frobenius norm of  $A = [a_{ij}] \in \mathbb{H}_{m \times n}$  are defined by  $\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}$  and  $\|A\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2}$ , respectively. We refer the reader to (Rodman, 2014; Wei et al., 2018) for this background information and further details on quaternions.

One way of dealing with a matrix  $A$  over the quaternion skew-field is to exploit its real matrix representation  $\psi(A)$  (Wei et al., 2018), which is defined for  $A = A_0 + A_1i + A_2j + A_3k \in \mathbb{H}_{m \times n}$  with  $A_0, A_1, A_2, A_3 \in \mathbb{R}_{m \times n}$  by

$$\psi(A) = \begin{bmatrix} A_1 & -A_2 & -A_3 & -A_4 \\ A_2 & A_1 & -A_4 & A_3 \\ A_3 & A_4 & A_1 & -A_2 \\ A_4 & -A_3 & A_2 & A_1 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

This real representation of a quaternion matrix is motivated by the fact that a quaternion matrix  $X$  satisfying the quaternion linear system in Equation (5) also satisfies the real linear system below:

$$\psi(A)\psi(X) = \psi(B). \tag{8}$$

We remark that there are alternative real representations of a quaternion matrix employed in the literature to convert a quaternion linear system as in Equation (5) into a real one as in Equation (8), but there is not a notable advantage of one over the others (Jia & Ng, 2021). The following properties can be verified for the real matrix representation of a quaternion matrix above we depend on here.

**Theorem 1 (Wei et al., 2018):** Let  $A, B \in \mathbb{H}_{m \times n}$ ,  $C \in \mathbb{H}_{n \times s}$  and  $k \in \mathbb{R}$ . The following assertions hold:

- i.  $A = B \Leftrightarrow \psi(A) = \psi(B)$ .
- ii.  $\psi(A + B) = \psi(A) + \psi(B)$ .
- iii.  $\psi(kA) = k\psi(A)$ .
- iv.  $\psi(AC) = \psi(A)\psi(C)$ .
- v.  $\psi(A^*) = \psi(A)^T$ .
- vi.  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$  is an invertible matrix if and only if  $\psi(A)$  is an invertible matrix, and, if  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$  is invertible, then  $\psi(A^{-1}) = \psi(A)^{-1}$ .
- vii.  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$  is a unitary matrix, i.e.,  $AA^* = A^*A = I$ , if and only if  $\psi(A)$  is an orthogonal matrix.
- viii.  $\|\psi(A)\|_F = 2\|A\|_F$ .

Next we formally define a right eigenvalue, and eigenvector of a square quaternion matrix.

**Definition 1 (Farenick & Pidkowich, 2003):** For  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$ , if the pair  $(\lambda, x) \in \mathbb{H} \times (\mathbb{H}_{n \times 1} \setminus \{0\})$  is such that  $Ax = x\lambda$ , then  $\lambda$  is called a right eigenvalue,  $x$  is called a right eigenvector corresponding to  $\lambda$ , and  $(\lambda, x)$  is called a right eigenpair of  $A$ .

If  $\lambda$  is a non-real right eigenvalue such that  $Ax = x\lambda$ , then  $Axs = xs(s^{-1}\lambda s)$  for every nonzero  $s \in \mathbb{H}$ . Hence, in case  $A$  has a non-real right eigenvalue, then it turns out that  $A$  has infinitely many non-real right eigenvalues. But if  $A$  is a Hermitian quaternion matrix, then all eigenvalues of  $A$  are real as stated next formally.

**Theorem 2 (Farenick & Pidkowich, 2003):** If  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$  is Hermitian, then every right eigenvalue of  $A$  is real and the number of right eigenvalues of  $A$  is  $n$ .

Now, we state the spectral theorem of a Hermitian quaternion matrix.

**Theorem 3 (Farenick & Pidkowich, 2003):** If  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$  is Hermitian, then there is a unitary matrix  $U \in \mathbb{H}_{n \times n}$  such that  $U^*AU$  is a diagonal matrix, whose diagonal entries are real and correspond to the eigenvalues of  $A$ .

Hermitian positive definite quaternion matrices play an important role in this work. The next result states that their real representations are also positive definite.

**Theorem 4 (Wei et al., 2018):** A matrix  $A \in \mathbb{H}_{n \times n}$  is Hermitian positive definite if and only if  $\psi(A)$  is a symmetric positive definite matrix.

The real representations of quaternion matrices possess special structure. To state the special structure possessed formally, we next introduce the notion of a JRS-symmetric matrix, and related structures.

**Definition 2 (Wei et al., 2018):** Let  $J_n, R_n$  and  $S_n$  be the following orthogonal matrices:

$$J_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -I_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_n \\ I_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_n & 0 & 0 \end{bmatrix}, R_n = \begin{bmatrix} 0 & -I_n & 0 & 0 \\ I_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_n \\ 0 & 0 & -I_n & 0 \end{bmatrix} \text{ and } S_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -I_n \\ 0 & 0 & I_n & 0 \\ 0 & -I_n & 0 & 0 \\ I_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

We define a JRS-symmetric, JRS-symplectic, and orthogonal JRS-symplectic matrix as follows:

- i. A matrix  $M \in \mathbb{R}_{4m \times 4n}$  is called JRS-symmetric if  $J_m M J_n^T = M$ ,  $R_m M R_n^T = M$  and  $S_m M S_n^T = M$ .
- ii. A matrix  $O \in \mathbb{R}_{4m \times 4n}$  is called JRS-symplectic if  $O J_n O^T = J_m$ ,  $O R_n O^T = R_m$  and  $O S_n O^T = S_m$ .
- iii. A matrix  $W \in \mathbb{R}_{4n \times 4n}$  is called orthogonal JRS-symplectic if it is orthogonal and JRS-symplectic.

The first one of the following two result relates JRS-symmetric matrices with quaternion matrices, while the second one spells out what distinguishes two different JRS-symmetric matrices.

**Theorem 5 (Wei et al., 2018):** A matrix  $M \in \mathbb{R}_{4m \times 4n}$  is JRS-symmetric if and only if  $M$  is a real matrix representation of a quaternion matrix.

**Theorem 6 (Wei et al., 2018):** A JRS-symmetric matrix is uniquely determined by its four submatrices on the first column block (or first row block).

In the next theorem,  $\psi(A)_c$  and  $\psi(A)_r$  denote the first column block and the first row block of a quaternion matrix  $A$ , respectively.

**Theorem 7 (Wei et al., 2018):** Letting  $A, B \in \mathbb{H}_{m \times n}$ ,  $C \in \mathbb{H}_{n \times s}$ ,  $q \in \mathbb{H}_{n \times 1}$  and  $k \in \mathbb{R}$ , we have

- i.  $\psi(A + B)_c = \psi(A)_c + \psi(B)_c$ ,  $\psi(A + B)_r = \psi(A)_r + \psi(B)_r$ ,
- ii.  $\psi(kA)_c = k\psi(A)_c$ ,  $\psi(kA)_r = k\psi(A)_r$ ,
- iii.  $\psi(AC)_c = \psi(A)\psi(C)_c$ ,  $\psi(AC)_r = \psi(A)_r\psi(C)$ ,
- iv.  $\psi(A^*)_c = (\psi(A)^T)_c$ ,  $\psi(A^*)_r = (\psi(A)^T)_r$ ,
- v.  $\|\psi(q)_c\|_2 = \|q\|_2$ ,  $\|\psi(q)_r\|_2 = \|q\|_2$ ,
- vi.  $\|\psi(A)_c\|_F = \|A\|_F$ ,  $\|\psi(A)_r\|_F = \|A\|_F$ .

## 2.2. The quaternion block conjugate gradient method

Let us consider the quaternion matrix equation  $AX = B$ . As the coefficient matrix is a Hermitian positive definite matrix, especially if the matrix  $A$  is sparse and large, a block conjugate gradient method is a good candidate to solve this quaternion matrix equation. As indicated in the previous section,  $AX = B$  holds if and only if  $\psi(A)\psi(X) = \psi(B)$  holds. Hence, instead of the quaternion matrix equation  $AX = B$ , we can solve the real matrix equation  $\psi(A)\psi(X) = \psi(B)$ . The sizes of the matrices  $\psi(A)$ ,  $\psi(X)$  and  $\psi(B)$  in this real matrix equation are  $4n \times 4n$ ,  $4n \times 4s$ , and  $4n \times 4s$ , respectively. However, it follows from Theorem 7 (iii) that the sizes of the latter two can be reduced. In particular, we can indeed solve  $\psi(A)\psi(X)_c = \psi(B)_c$  instead of  $\psi(A)\psi(X) = \psi(B)$ ; the upside of doing so is that the unknown  $\psi(X)_c$  and the right-hand side  $\psi(B)_c$  are both of size  $4n \times s$ , that is we now solve  $s$  linear systems simultaneously instead of  $4s$  simultaneous linear systems needed for  $\psi(A)\psi(X) = \psi(B)$ . Moreover, the quaternion solution  $X \in \mathbb{H}_{n \times s}$  of  $AX = B$  can be formed immediately from the real solution  $\psi(X)_c$  of  $\psi(A)\psi(X)_c = \psi(B)_c$ .

By Theorem 4, the real matrix  $\psi(A)$  is symmetric and positive definite, so we can apply the block conjugate gradient method to solve the real matrix equation  $\psi(A)\psi(X)_c = \psi(B)_c$  using the real floating point arithmetic. For the sake of simplifying the notation, let us denote  $\psi(A)$ ,  $\psi(X)_c$ ,  $\psi(B)_c$

with  $\mathcal{A}$ ,  $\mathcal{X}$ , and  $\mathcal{B}$ , respectively. Letting  $\mathcal{X}_0$  be an initial guess matrix for the solution  $\mathcal{X}$ , and  $\mathcal{R}_0$  be the corresponding residual matrix, i.e.,  $\mathcal{R}_0 := \mathcal{B} - \mathcal{A}\mathcal{X}_0$ , the block Krylov subspace is defined as

$$\mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0) = \text{span}\{\mathcal{R}_0, \mathcal{A}\mathcal{R}_0, \dots, \mathcal{A}^{k-1}\mathcal{R}_0\}. \quad (10)$$

Observe that, denoting the  $i$ th columns of  $\mathcal{B}$  and  $\mathcal{X}$  with  $\mathcal{b}_i$  and  $x_i$ , respectively, the solution  $\mathcal{X} = [x_1|x_2| \dots |x_s]$  of  $\mathcal{A}\mathcal{X} = \mathcal{B}$  is the unique global minimizer of

$$\Phi(\mathcal{X}) := \sum_{i=1}^s \varphi_i(x_i) := \sum_{i=1}^s \frac{1}{2} x_i^T \mathcal{A}x_i - x_i^T \mathcal{b}_i. \quad (11)$$

Indeed, since  $\mathcal{A}$  is a symmetric positive definite matrix, the objective function  $\Phi(\mathcal{X})$  has only one global minimizer, that is the unique solution of  $\nabla\Phi(\mathcal{X}) = \mathcal{A}\mathcal{X} - \mathcal{B} = 0$ . The block conjugate gradient method seeks the global minimizer  $\mathcal{X}_k$  of  $\Phi(\mathcal{X})$  over the affine space  $\mathcal{X}_0 + \mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0)$ . Equivalently, letting  $\mathcal{X}_*$  be the solution of  $\mathcal{A}\mathcal{X} = \mathcal{B}$ , the matrix  $\mathcal{X}_k$  is also the global minimizer  $\|\mathcal{X} - \mathcal{X}_*\|_{F, \mathcal{A}}^2 := \text{trace}((\mathcal{X} - \mathcal{X}_*)^T \mathcal{A}(\mathcal{X} - \mathcal{X}_*))$  over the space  $\mathcal{X}_0 + \mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0)$ . Hence, the block conjugate gradient method at iteration  $k$  finds the matrix in the affine space  $\mathcal{X}_0 + \mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0)$  that is closest to the actual solution  $\mathcal{X}_*$  of  $\mathcal{A}\mathcal{X} = \mathcal{B}$  with respect to the weighted Frobenius norm  $\|\cdot\|_{F, \mathcal{A}}^2$ . The between the iterates  $\mathcal{X}_{k+1}$  and  $\mathcal{X}_k$  of the conjugate method at two consecutive iterations can be represented as

$$\mathcal{X}_{k+1} = \mathcal{X}_k + \mathcal{P}_{k+1}\Lambda_{k+1}, \quad (12)$$

where  $\mathcal{P}_{k+1} \in \mathbb{R}_{n \times s}$  with columns in  $\mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0)$  corresponds to the  $s$  search directions for the solutions of the  $s$  linear systems, and  $\Lambda_{k+1} \in \mathbb{R}_{s \times s}$  is a diagonal matrix with entries on the diagonal representing the step lengths that determine how big steps should be taken in search directions. As  $\mathcal{X}_{k+1}$  is the minimizer over  $\mathcal{X}_0 + \mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0)$ , the diagonal step-length matrix  $\Lambda_{k+1} \in \mathbb{R}_{s \times s}$  must satisfy

$$\frac{\partial \Phi(\mathcal{X}_k + \mathcal{P}_{k+1}\Lambda_{k+1})}{\partial \Lambda_{k+1}} = \mathcal{P}_{k+1}^T (\mathcal{A}(\mathcal{X}_k + \mathcal{P}_{k+1}\Lambda_{k+1}) - \mathcal{B}) = 0. \quad (13)$$

The new search directions  $\mathcal{P}_{k+1} \in \mathbb{R}_{n \times s}$  can be expressed in terms of the previous search directions  $\mathcal{P}_k$  as

$$\mathcal{P}_{k+1} = \mathcal{R}_k + \mathcal{P}_k\Omega_{k+1}, \quad (14)$$

where  $\mathcal{R}_k = \mathcal{B} - \mathcal{A}\mathcal{X}_k$  and the parameter matrix  $\Omega_{k+1}$  is given by  $\Omega_{k+1} = -(\mathcal{P}_k^T \mathcal{A} \mathcal{P}_k)^{-1} (\mathcal{P}_k^T \mathcal{A} \mathcal{R}_k)$ . This expression is also obtained by exploiting the optimality of  $\mathcal{X}_{k+1}$ , more specifically the fact that it is the minimizer of  $\Phi(\mathcal{X})$  over  $\mathcal{X}_0 + \mathcal{K}_{k+1}(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0)$ . As it turns out, the optimality of  $\mathcal{X}_{k+1}$  implies the orthogonality of  $\mathcal{X}_{k+1} - \mathcal{X}_0$  to every vector in  $\mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0)$ , i.e.,  $\text{trace}(\mathcal{Z}^T \mathcal{A}(\mathcal{X}_{k+1} - \mathcal{X}_0)) = 0$  for all  $\mathcal{Z} \in \mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0)$ . This in turn gives rise to the equality in Equation (14). It is straightforward to deduce  $\mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0) = \text{span}\{\mathcal{R}_0, \mathcal{A}\mathcal{R}_0, \dots, \mathcal{A}^{k-1}\mathcal{R}_0\} = \text{span}\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_{k-1}\}$  and  $\mathcal{R}_j^T \mathcal{R}_k = 0$  for  $j = 1, 2, \dots, k-1$ . From this fact and  $\mathcal{P}_k \in \mathcal{K}_k(\mathcal{A}, \mathcal{R}_0)$ , it can also be deduced that  $\mathcal{P}_k^T \mathcal{R}_k = 0$  as well as  $\mathcal{P}_{k+1}^T \mathcal{A} \mathcal{P}_k = 0$ . To summarize, the following properties hold among the residuals and search directions:

- i.  $\mathcal{R}_j^T \mathcal{R}_k = 0$  for  $j \neq k$ ,
- ii.  $\mathcal{P}_k^T \mathcal{R}_k = 0$ ,
- iii.  $\mathcal{P}_{k+1}^T \mathcal{A} \mathcal{P}_k = 0$ .

By employing the orthogonality properties above, the expressions for  $\Lambda_{k+1}$  and  $\Omega_{k+1}$  can be rewritten as

$$\Lambda_{k+1} = (\mathcal{P}_{k+1}^T \mathcal{A} \mathcal{P}_{k+1})^{-1} \mathcal{R}_k^T \mathcal{R}_k \text{ and } \Omega_{k+1} = (\mathcal{R}_{k-1}^T \mathcal{R}_{k-1})^{-1} \mathcal{R}_k^T \mathcal{R}_k. \quad (15)$$



A description of the overall block conjugate algorithm for the real matrix equation  $\mathcal{A}\mathcal{X} = \mathcal{B}$  is given in Algorithm 1 below.

Algorithm 1. The block conjugate gradient algorithm

---

Input: $\mathcal{A} \in \mathbb{R}_{4n \times 4n}$ , $\mathcal{B} \in \mathbb{R}_{4n \times s}$ , maximum number of iterations $\kappa$ , termination tolerance $\varepsilon$
Output: An approximate solution $\widehat{\mathcal{X}}$ for $\mathcal{A}\mathcal{X} = \mathcal{B}$

---

Chose an initial guess matrix  $\mathcal{X}_0$ ,  $\mathcal{R}_0 = \mathcal{B} - \mathcal{A}\mathcal{X}_0$ ,  $k = 0$   
 while  $k \leq \kappa$  and  $\|\mathcal{R}_k\|_F > \varepsilon$   
     If  $k = 0$ , then  
          $\mathcal{P}_0 := \mathcal{R}_0$   
     else  
          $\Omega_{k+1} = (\mathcal{R}_{k-1}^T \mathcal{R}_{k-1})^{-1} \mathcal{R}_k^T \mathcal{R}_k$  and  $\mathcal{P}_{k+1} = \mathcal{R}_k + \mathcal{P}_k \Omega_{k+1}$   
     end  
      $\Lambda_{k+1} = (\mathcal{P}_{k+1}^T \mathcal{A} \mathcal{P}_{k+1})^{-1} \mathcal{R}_k^T \mathcal{R}_k$   
      $\mathcal{X}_{k+1} = \mathcal{X}_k + \mathcal{P}_{k+1} \Lambda_{k+1}$   
      $\mathcal{R}_{k+1} = \mathcal{R}_k - \mathcal{A} \mathcal{P}_{k+1} \Lambda_{k+1}$   
      $k = k + 1$   
 end  
 $\widehat{\mathcal{X}} = \mathcal{X}_k$

---

### 3. Results

In this section, we demonstrate the accuracy and convergence of the proposed method on a quaternion matrix equation  $AX = B$  with a rectangular tall and skinny coefficient matrix  $A$ . The best solution to this matrix equation in the least-squares sense is found by solving the normal equation associated with the original matrix equation. The normal equation is always consistent, that is it always has a solution. More specifically, we consider a quaternion matrix equation  $AX = B$ , where  $A \in \mathbb{H}_{400 \times 80}$ ,  $B \in \mathbb{H}_{400 \times 10}$ , and  $X \in \mathbb{H}_{80 \times 10}$ . The normal equation associated with this quaternion matrix equation is  $A^*AX = A^*B$ . The coefficient matrix of the normal equation  $A^*A$  is always Hermitian positive definite, so we can apply the block conjugate gradient method described in Section 2.2 to solve the normal equation  $A^*AX = A^*B$ . By exploiting the real matrix representations of  $A^*A$ ,  $X$  and  $B$ , we transform the quaternion normal equation  $A^*AX = A^*B$  into the real matrix equation

$$\psi(A^*A)\psi(X) = \psi(A^*B). \quad (16)$$

This transformation yields the real matrices  $\psi(A^*A)$ ,  $\psi(X)$  and  $\psi(A^*B)$ , whose dimensions are  $320 \times 320$ ,  $320 \times 40$  and  $320 \times 40$ , respectively. As suggested in the previous section, we can further reduce the dimensions of the matrices in Equation (16) by instead solving

$$\psi(A^*A)\psi(X)_c = \psi(A^*B)_c. \quad (17)$$

The solution  $X$  of the normal equation  $A^*AX = A^*B$ , hence the least-squares solution of  $AX = B$ , can then be retrieved from  $\psi(X)_c$ .

Hence, using now the short-hands  $\mathcal{A}$ ,  $\mathcal{X}$  and  $\mathcal{B}$  for  $\psi(A^*A)$ ,  $\psi(X)_c$ ,  $\psi(A^*B)_c$ , respectively, we apply Algorithm 1 to  $\mathcal{A}\mathcal{X} = \mathcal{B}$  by setting the maximum number of iterations equal to 40. The convergence of the algorithm is illustrated in Figure 1 and Figure 2. To be precise, the plot in Figure 1 depicts the residual norm  $\|\psi(B)_c - \psi(A)(\psi(X)_c)_k\|_F$  for the real matrix equation  $\psi(A)\psi(X)_c = \psi(B)_c$  as a function of number of iterations  $k$ . On the other hand, the plot in Figure 2 shows the residual norm  $\|\mathcal{R}_k\|_F = \|\mathcal{B} - \mathcal{A}\mathcal{X}_k\|_F$  for the normal equations  $\mathcal{A}\mathcal{X} = \mathcal{B}$  as a function of  $k$ . When the coefficient matrix is unitarily diagonalizable (normal), the convergence behavior of the conjugate gradient method is determined by the eigenvalue distribution of the coefficient matrix. In the example we consider here, the matrix  $A \in \mathbb{H}_{400 \times 80}$  is formed so that  $A^*A$  has 10 distinct eigenvalues. Not

surprisingly, the residual norms in Figure 1 and 2 decay initially up until the 10th iteration, but do not change much starting from 10th iteration and afterwards. In Figure 1, the residual norm becomes 114 at the 10th iteration, and remains more or less 114 after the 10th iteration. This is expected as the linear system  $\psi(A)\psi(X)_c = \psi(B)_c$ , equivalently the linear system  $AX = B$ , has no solution, but the conjugate gradient method (Algorithm 1) converges nearly to the least-squares solution minimizing  $\|\psi(B)_c - \psi(A)(\psi(X)_c)_k\|_F$  over all  $X$  by the 10th iteration, as the solution to the associated normal equation is nearly converged by then. Meanwhile, in Figure 2 it can be observed that the residual norm associated with the normal equation decays to zero by the 10th iteration, and remains so afterwards, which is expected as the conjugate gradient method is applied to solve the normal equation that has a solution.

We have also perturbed the coefficient matrix so that for the resulting  $A \in \mathbb{H}_{400 \times 80}$  the matrix  $A^*A$  has no more repeated eigenvalues, rather it has eigenvalues clustered around 10 real points. The plots of the residual norms  $\|\psi(B)_c - \psi(A)(\psi(X)_c)_k\|_F$  and  $\|\mathcal{R}_k\|_F = \|\mathcal{B} - \mathcal{A}\mathcal{X}_k\|_F$  for this slightly perturbed matrix equation are given in Figure 3 and Figure 4, respectively. Notice that, as before, the residual norms decay rapidly in the first 10 iterations. Though the decay in the residual norms slows down gradually after the 10th iteration, the decays in the residuals continue even after the 10th iteration, in particular the residuals do not remain constant after the 10th iteration anymore. This behavior in the residuals is expected, as the matrix  $A^*A$  has now all distinct eigenvalues.

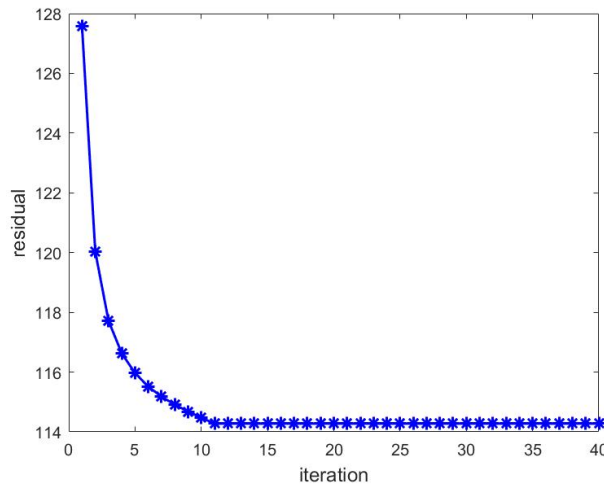


Figure 1. The decay of the residual norm  $\|\psi(B)_c - \psi(A)(\psi(X)_c)_k\|_F$  as a function of  $k$  for the quaternion matrix equation  $AX = B$  in Section 3.

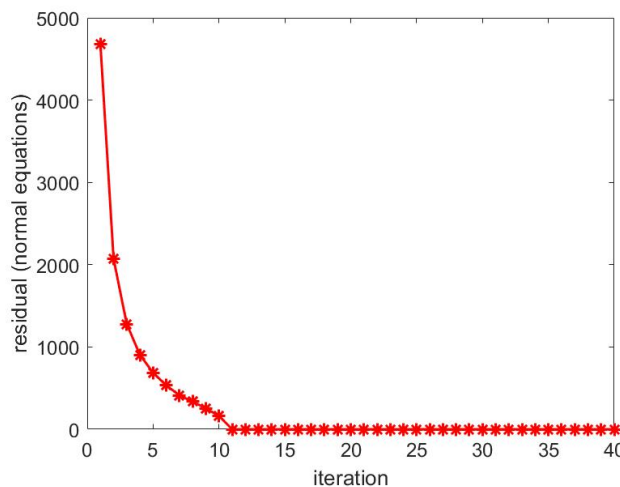


Figure 2. The decay of the residual norm  $\|\mathcal{B} - \mathcal{A}\mathcal{X}_k\|_F$  associated with the normal equation  $\mathcal{A}\mathcal{X} = \mathcal{B}$  with  $\mathcal{A} = \psi(A^*A)$ ,  $\mathcal{X} = \psi(X)_c$  and  $\mathcal{B} = \psi(A^*B)_c$  as a function of  $k$  for the quaternion matrix equation  $AX = B$  in Section 3.

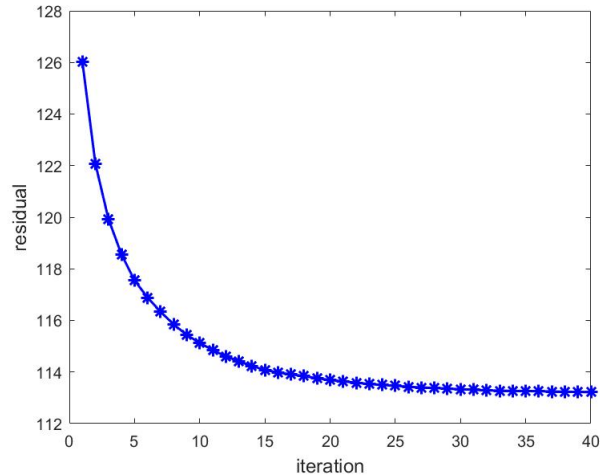


Figure 3. This is a plot of the residual norms as in Figure 1, but only now the coefficient matrix  $A$  is perturbed so that it has distinct eigenvalues clustered around 10 points on the real axis.

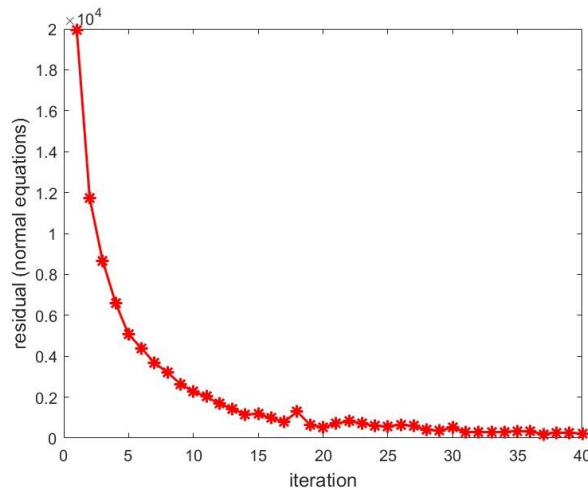


Figure 4. Plot of residual norms as in Figure 2, but the coefficient matrix  $A$  is perturbed so that it has distinct eigenvalues clustered around 10 points.

#### 4. Discussion and Conclusion

Problems involving quaternion objects, defined over the skew-field of quaternions, arise from a wide variety of applications. Especially, solving quaternion linear systems has attracted substantial attention, recently. The analytical tools such as the Moore-Penrose Inverse, Kronecker product are very expensive computationally, and not useful if the linear system has a large and sparse quaternion coefficient matrix. Iterative methods, on the other hand, may be applicable to such large-scale sparse quaternion linear systems.

In this study, we have considered several quaternion linear systems with the same Hermitian quaternion coefficient matrix. One way of dealing with quaternion linear systems is to use the real representations of quaternion matrices. We have first applied the transformation that converts the quaternion coefficient matrix, the right-hand sides and the solution to their real representations. The resulting linear systems are real, all with a common symmetric positive definite coefficient matrix. We have taken into account the special structure of the real representation of a quaternion matrix to reduce the number of resulting real linear systems to be solved. Subsequently, a block conjugate gradient method is applied to solve the real linear systems simultaneously in real arithmetic; solving systems simultaneously by a block method potentially reduces the number of iterations, hence improves the efficiency and storage requirements. The conversion of the real representation of the solution of the

original quaternion system returned by the block conjugate gradient method to the actual quaternion solution is performed in the end without any computational burden. The proposed method is implemented in Matlab, and its convergence to the actual solution is verified on two numerical examples. These numerical experiments illustrate that, as expected, how quickly the block conjugate gradient method converges depends on the number of clusters of the eigenvalues of the Hermitian quaternion coefficient matrix; the smaller is the number of clusters, the faster is the convergence.

As future work, we intend to focus on the solutions of quaternion matrix equations such as Sylvester, Lyapunov, and Stein matrix equations by block conjugate gradient methods. Computing special type of solutions (e.g., symmetric, centrosymmetric) of these quaternion matrix equations may be of interest. Moreover, the solutions of these matrix equations can be tried to be retrieved with applications of alternative iterative methods such as a block GMRES method in case Hermiticity and/or positive-definiteness features do not exist.

## References

- Adler, S. L. (1995). *Quaternionic Quantum Mechanics and Quantum Fields*. New York, USA: Oxford University Press.
- Arena, P., Fortuna, L., Muscato, G., & Xibilia, M. G. (1998). *Neural Networks in Multidimensional Domains*. London, UK: Springer.
- Caccavale, F., Natale, C., Siciliano, B., & Villani, L. (1999). Six-DOF impedance control based on angle/axis representations. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(2), 289-300. doi:10.1109/70.760350
- Farenick, D. R., & Pidkowich, B. A. F. (2003). The spectral theorem in quaternions. *Linear Algebra and its Applications*, 371, 75-102. doi:10.1016/S0024-3795(03)00420-8
- Feng, Y. T., Owen, D. R. J., & Peric, D. (1995). A block conjugate gradient method applied to linear systems with multiple right-hand sides. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 127, 203-215. doi:10.1016/0045-7825(95)00832-2
- He, Z. H., Wang, X. X., & Zhao, Y. F. (2023). Eigenvalues of quaternion tensors with applications to color video processing. *Journal of Scientific Computing*, 94, 1-15. doi:10.1007/s10915-022-02058-5
- Ji, H., & Li, Y. (2017) Block conjugate gradient algorithms for least squares problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 317, 203-217. doi:10.1016/j.cam.2016.11.031
- Jia, Z., & Ng, M. K. (2021). Structure preserving quaternion generalized minimal residual method. *Journal on Matrix Analysis and Applications*, 42(2), 616-634. doi:10.1137/20M133751X
- O'Leary, D. P. (1980). The block conjugate gradient algorithm and related methods. *Linear Algebra and Its Applications*, 29, 293-322. doi:10.1016/0024-3795(80)90247-5
- Opfer, G. (2005). The conjugate gradient algorithm applied to quaternion valued matrices. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 85(9), 660-672. doi:10.1002/zamm.200410191
- Rodman, L. (2014). *Topics in Quaternion Linear Algebra*. New Jersey, USA: Princeton University Press.
- Sangwine, S. J. (1996). Fourier transforms of colour images using quaternion or hypercomplex, numbers. *Electronics Letters*, 32(21), 1979-1980. doi:10.1049/el:19961331
- Wei, M., Li, Y., Zhang, F., & Zhao, J. (2018). *Quaternion Matrix computations*. New York, USA: Nova Science Publishers.
- Wendland, H. (2018). *Numerical Linear Algebra: An Introduction*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.



Research Article

## A Novel Membership Function Definition for Fuzzy Classification

Nur UYLAŞ SATI

Muğla Sıtkı Koçman University, Bodrum Vocational High School, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, 48100, Muğla, Türkiye

Nur UYLAŞ SATI, ORCID No: 0000-0003-1553-9466

Corresponding author e-mail: nursati@mu.edu.tr

### Article Info

Received: 20.01.2023

Accepted: 16.03.2023

Online August 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1239769](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1239769)

### Keywords

Data mining,  
Fuzzy classification,  
Mathematical optimization,  
Membership functions,  
Polyhedral conic functions

**Abstract:** In this paper, a novel membership function is defined for fuzzy sets using a supervised learning approach. Firstly, the training dataset is separated using the previously defined polyhedral conic functions in a supervised learning approach. Then obtained polyhedral conic functions are used for defining a new membership function. After that, a new fuzzy classification algorithm is formed to classify fuzzy sets with a similar structure. The algorithm with all suggested methods is implemented on real-world datasets, and the performance values are compared with the state of art classification algorithms.

## Bulanık Sınıflandırma için Yeni Bir Üyelik Fonksiyon Tanımlaması

### Makale Bilgileri

Geliş: 20.01.2023

Kabul: 16.03.2023

Online Ağustos 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1239769](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1239769)

### Anahtar Kelimeler

Bulanık sınıflandırma,  
Çok yüzlü konik fonksiyonlar,  
Matematiksel optimizasyon,  
Üyelik fonksiyonu,  
Veri madenciliği

**Öz:** Bu çalışmada gözetimli öğrenme yaklaşımı kullanılarak bulanık kümeler için yeni bir üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. İlk olarak, gözetimli öğrenme yaklaşımında, eğitim veri kümesi, önceden tanımlanmış çokyüzlü konik fonksiyonlarla ayrılmış ve daha sonra elde edilen bu çokyüzlü konik fonksiyonlar yeni bir üyelik fonksiyonu tanımlamak için kullanılmıştır. Sonrasında ise bu fonksiyon kullanılarak benzer yapıda bulanık kümeleri sınıflandırmak için yeni bir bulanık sınıflandırma algoritması tanımlanmıştır. Önerilen tüm yöntemler bir algortmada birleştirilerek, veri kümeleri üzerinde denenmiş ve performans değerleri, literatürde yer alan sınıflandırma algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır.

## 1. Introduction

Machine learning is an important research area of artificial intelligence, which uses the information gained from data and algorithms to learn as humans learn. Various methods are used in machine learning, such as learning associations, classification, regression, unsupervised learning (clustering) and reinforcement learning. Fuzzy classification is one of these machine learning techniques based on fuzzy logic and aims to classify fuzzy sets by a defined machine-learning technique (Alpaydin, 2010).

Defining membership functions or fuzzy rules is the most critical work in constructing a fuzzy classification system. Fuzzy membership functions and fuzzy rules can be formulated based on expert knowledge or data-driven approaches. These approaches utilize a machine learning process based on training instances. The expert knowledge approach can be non-confidential since the experts can define so different rules or membership functions for the same case. From this point of view, the automatic construction of membership functions is preferable. Various methods based on machine learning and statistics are proposed in the literature to generate membership functions (Mendes et al., 2001; Sanz et al., 2010; Makrehchi & Kamel, 2011; Borkar & Rajeswari, 2013; Jamsandekar & Mudholkar, 2014; Bhattacharyya & Mukherjee, 2020; Rapheal & Bhattacharya, 2020; Satı, 2020; Xie et al., 2021; Azam et al., 2021).

Xie et al. (2021) proposed a novel polynomial membership function approach for polynomial fuzzy system stability analysis. Conservatism is reduced in this new approach, and comparisons present the effect of this reduction with other methods.

An approach for generating fuzzy Gaussian and triangular membership function using fuzzy c-means was considered by Azam et al. (2021). The problem related to sunspot prediction was considered and its accuracy was calculated. It is evident from the results that the proposed technique of generating membership functions using fuzzy c-means can be adopted for predicting sunspots.

In the paper of Bhattacharyya & Mukherjee (2020), 33 different membership function evaluation methodologies published between 1971 and 2016 were discussed. Three different case studies were done to check the applicability and tractability of the method.

Rapheal & Bhattacharya (2020) predicted stock market prices by defining a new membership function that uses the minor error of prediction in a fuzzified repeated incremental pruning to produce error reduction (RIPPER) hybrid model. They used rule based system (RBS) and RIPPER in a hybrid model. Gaussian, triangle and trapezoidal memberships of the fuzzy rule based system (FRBS) were regarded. The performance analysis considered mean absolute percentage error (MAPE) for all the membership functions.

In the paper of Satı (2020), by using the labeled data's means and medoids novel membership functions were defined for labeling unsupervised ones and also defined membership values were used in the classification phase in the linear programming problem. The suggested algorithm was tested on real-world datasets and compared with the state-of-the-art semi-supervised methods. The results indicated that the suggested algorithm is effective in classification and worth studying.

This paper presents a new method for constructing membership functions using polyhedral conic functions in optimization-based programming techniques. The main novelty of this work lies in defining a new membership function using polyhedral conic functions (PCFs) and mathematical techniques. In addition to making an essential contribution to the scientific literature, the presented method is also useful for many fields, such as control systems engineering, image processing, power engineering, industrial automation, robotics, education, consumer electronics, and optimization, where fuzzy logic is used (Singh et al., 2013)

In Section 2, the basic concepts of fuzzy sets and the techniques that will be used in fuzzy classification are explained in detail. The proposed method is presented by related instructions and pseudocode of the suggested algorithm in Section 3. In Section 4, the experimental results are presented and discussed. In Section 5, the paper is finalized and future works are suggested.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Datasets

In this paper, two different typed datasets are used. Firstly in the supervised training process, a binary dataset is used. Binary datasets only have two (usable) values: 0 or 1. These labels can be used in health data for disease diagnosis, as 0 for healthy and 1 for unhealthy patients. The used binary dataset is given below with mathematical symbols.

$$A = \{(a^i, 0) | a^i \in R^n\}, i = 1, \dots, m, B = \{(b^j, 1) | b^j \in R^n\}, j = 1, \dots, p. \quad (1)$$



In the study's second phase, fuzzy sets will be used in implementations and experiments. A fuzzy set consists of objects with different grades of membership. Membership functions determine the grades (between 0 and 1). The theory of fuzzy sets is used in various research areas. For example, in health studies, it is sometimes hard to say whether a patient is strictly sick. It may be more appropriate to give the rate of getting the disease a certain percentage. The used fuzzy set is given below with mathematical symbols.

$$C = \left\{ (c^l, \mu_c(c^l)) \mid c^l \in R^n \right\}, \quad 0 \leq \mu_c(c^l) \leq 1, \quad l = 1, \dots, r \quad (2)$$

Here “ $a$ ”, “ $b$ ” and “ $c$ ” are  $n$ -dimensional vectors (point or data) in which every dimension represents an attribute of the data. “ $m$ ”, “ $p$ ” and “ $r$ ” are the number of the points in the datasets respectively in  $A$ ,  $B$  and  $C$ .

## 2.2. Polyhedral conic functions (PCFs)

In this paper, PCFs approach is utilized in the training phase to find a function that separates two distinct datasets.

PCFs were defined in 2006 by Gasimov & Ozturk to distinguish two different labeled point sets (Gasimov & Ozturk, 2006).

Polyhedral functions are identified as a function in the paper of Gasimov & Ozturk (2006):

$$g_{(w,\xi,\gamma,a)} : IR^n \rightarrow IR = w'(x-a) + \xi \|x-a\|_1 - \gamma \quad (3)$$

where  $x$  is an  $n$ -dimensional data,  $x, w, a \in IR^n$ ,  $\xi, \gamma \in IR$ ,  $w'x = w_1x_1 + \dots + w_nx_n$ ,  $\|x\|_1 = |x_1| + \dots + |x_n|$ .

Definition 1 and Lemma 1 quoted below were given and proofed in the paper of Gasimov & Ozturk (2006).

Lemma 1: A graph of the function  $g_{(w,\xi,\gamma,a)}$  defined in (1) is a polyhedral cone with a vertex at  $(a, -\gamma) \in IR^n \times IR$ . This cone is called a polyhedral conic set and “ $a$ ” its center.

From Lemma 1, every polyhedral function given in (3) acts as a polyhedral conic function (PCF).

Definition 1: A function  $g : IR^n \times IR$  is called polyhedral conic if its graph is a cone and all its level sets  $S_\alpha = \{x \in IR^n : g(x) \leq \alpha\}$ ,  $\alpha \in IR$  are polyhedrons.

## 2.3. MinMax normalization technique

In this paper, for membership function construction besides PCFs, the min-max normalization technique is used. In the Min-max algorithm, a linear transformation is done on the original data ( $O$ ).  $x_{min}$  and  $x_{max}$  are defined as the minimum and the maximum of a variable in the samples. The Min-max algorithm uses the following formula to map a value,  $y$ , to a value,  $y'$ . (Cao et al., 2016):

$$y' = \frac{y - \min_o}{\max_o - \min_o} (new\_max_o - new\_min_o) + new\_min_o \quad (4)$$

## 3. A Novel Algorithm for Fuzzy Classification

A novel algorithm is defined in this paper for fuzzy classification. There are two main procedures in the algorithm: training and finding the separative PCFs with the binary labeled data and constructing the membership function by the obtained PCFs for fuzzy classifying the fuzzy data. The first process is executed by a previously defined PCFs approach for separation. In the second process, a novel membership is defined using the min-max normalization technique given in Section 2.3.

Let  $A, B$  and  $C$  be given sets containing  $m \in \mathbb{Z}^+, p \in \mathbb{Z}^+$ , and  $r \in \mathbb{Z}^+$   $n$ -dimensional points, respectively:

$A = \{a^i \in \mathbb{R}^n, i \in I\}$ ,  $B = \{b^j \in \mathbb{R}^n, j \in J\}$  and  $C = \{c^t \in \mathbb{R}^n, t \in T\}$  where  $I = \{1, \dots, m\}$ ,  $J = \{1, \dots, p\}$  and  $T = \{1, \dots, r\}$ .

**Algorithm 1:** An Algorithm for Fuzzy Classification

Step 0. Let  $l=1, I_l=I, A_l=A$  and go to step 1.

Step 1. Let  $a^l$  be an arbitrary point of  $A$ . Solve subproblem  $(P_l)$ .

$$(P_l) \min\left(\frac{y^l e_m}{m}\right), \tag{5}$$

$$w^l(a^i - a^l) + \xi \|a^i - a^l\|_1 - \gamma + 1 \leq y_i, \quad \forall i \in I_l, \tag{6}$$

$$-w^l(b^j - a^l) - \xi \|b^j - a^l\|_1 + \gamma + 1 \leq 0, \quad \forall j \in J, \tag{7}$$

$$y = (y_1, \dots, y_m) \in \mathbb{R}_+^m, w \in \mathbb{R}^n, \xi \in \mathbb{R}, \gamma \geq 1 \tag{8}$$

Let  $w^l, \xi^l, \gamma^l, y^l$  be a solution of  $(P_l)$ . Let

$$g_l(x) = g_{(w^l, \xi^l, \gamma^l, a^l)}(x) \tag{9}$$

Step 2.  $I_{l+1} = \{i \in I_l : g_l(a^i) + 1 > 0\}$ ,  $A_{l+1} = \{a^i \in A_l : i \in I_{l+1}\}$ ,  $l = l + 1$ . If  $A_l \neq \emptyset$  go to Step 1.

Step 3. Define the function  $g(x)$  (dividing the sets  $A$  and  $B$ ) as

$$g(x) = \min_l g_l(x). \tag{10}$$

Step 4. Define bound as the threshold value:

$$\text{bound} = \max_j g(x_j), j = 1, \dots, p. \tag{11}$$

Step 5. Define the membership function for  $C$  set:

$$\mu_c(x) = \begin{cases} \frac{g(x)}{\text{bound}}, & \text{bound} > g(x) > 0, \\ 0, & g(x) \leq 0, \\ 1, & g(x) \geq \text{bound}. \end{cases} \tag{12}$$

Step 6. Define the class of the point  $(x)$ :

$$C(x) = \begin{cases} 1, & \mu_c(x) > 0.5 \\ 0, & \mu_c(x) \leq 0.5. \end{cases} \tag{13}$$

Stop.

In the defined algorithm, the novelty takes part in Steps 4, 5, and 6. The before steps are previously defined PCFs classification algorithm. This algorithm was modified in the papers of Uylaş Satı (2015) and Ozturk & Ciftci (2015) to decrease the running time and avoid the over-fitting by allowing the miss-classifications. However, in this approach, the first defined algorithm in the paper of Gasimov & Ozturk (2006), which guarantees a separation with 100% accuracy, is used since the points with  $g(x) \leq 0$  are labeled with a strict 1.

In step 4, bound is defined as a threshold of the 0 labeled points such that the points  $g(x) \geq bound$  are labeled with a strict 0. (see Equation (11))

In step 5, the essential part of the fuzzy logic, the membership function, is defined using obtained PCFs and the bound value.

For the fuzzy points(x) which ensures “ $bound > g(x) > 0$ ” the membership value is defined by using the min-max normalization technique. In Equation (4) mentioned in Section 2.3, minA is defined as 0 and maxA is defined as bound, new\_minA is defined as 0 and new\_maxA is defined as 1. After identifying these parameters, Equation (4) is defined as “ $\frac{g(x)}{bound}$ ” in the membership function

$\mu_C(x)$ . If the membership is nearly 1, it can be said that the point is so near to being labeled 1. For the points(x) ensures “ $g(x) \leq 0$ ” and “ $g(x) \geq bound$ ” is labeled respectively with a strict 1 and 0 (see Equation (12)).

Finally, in step 6, a simple defuzzification is defined for getting crisp values (class labels) to use in performance analysis. In this defined algorithm, since binary classification has been experimented with and the used datasets are binary, just a line is used for separation (see Figure 2). If the membership value ( $\mu_C(x)$ ) of a point is nearly 1, then it can be told that the point is so near to be labeled as 1, from this point of view, the equation defined in (9) is used for defuzzification. Here the 0.5 value of equation (13) can be defined due to the problem structure. For example, this value can be increased in health cases since mortal decisions are required. In other words, experts can define this parameter for different problems.

#### 4. Numerical Experiments and Results

Numerical experiments are presented in this section to discuss the suggested algorithm's efficiency. Accuracy is used in the numerical experiments for the performance analysis.

Before implementing the algorithm on real-world datasets for comparison, a simple synthetic dataset with one attribute is experimented with, and the results are shown in the figures for better realization. The used datasets are given below:

$$\begin{aligned} \text{Training dataset} &= \{(1,1), (2,0), (3,0), (8,0), (0,1), (4,1), (5,1), (7,1), (6,1), (10,1), (11,1)\} \\ \text{Test (Fuzzy) dataset} &= \{(1.5,0), (0.5,1), (3.5,0), (12,1), (4.5,0), (6.5,0)\} \end{aligned}$$

In the algorithm, the training dataset is defined as  $A$  and  $B$  sets, and the fuzzy set is defined as  $C$ . The steps 0, 1, 2, and 3 training datasets are used for getting separative PCFs. The obtained functions ( $g_1, g_2$ ) and training dataset (blue circles defines “0” labeled data and red circles defines “1” labeled data) are shown in Figure 1. After finding the  $g(x)$  (separative function), in steps 4 and 5, the membership function is defined via obtained  $g(x)$  and determined bound value. The obtained membership values of the test (fuzzy) set are shown in Figure 2(a). In step 6, defuzzification for getting crisp values (i.e., labels), equation (13) is applied. For separation  $y=0.5$  line is used (see Figure 2(a)). In Figure 2(b), the classes (labels) of the fuzzy set are shown.

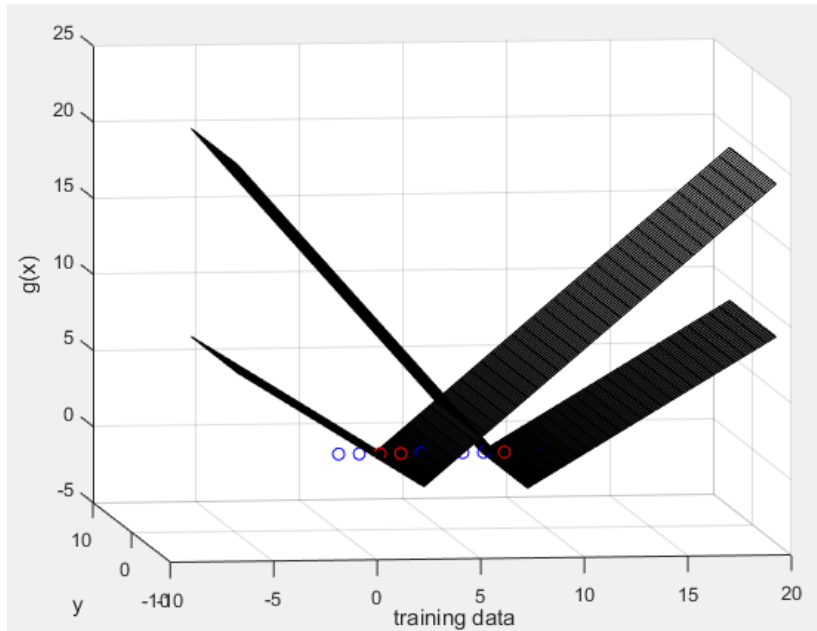


Figure 1. Obtained PCFs ( $g(x)$ ) with training data.

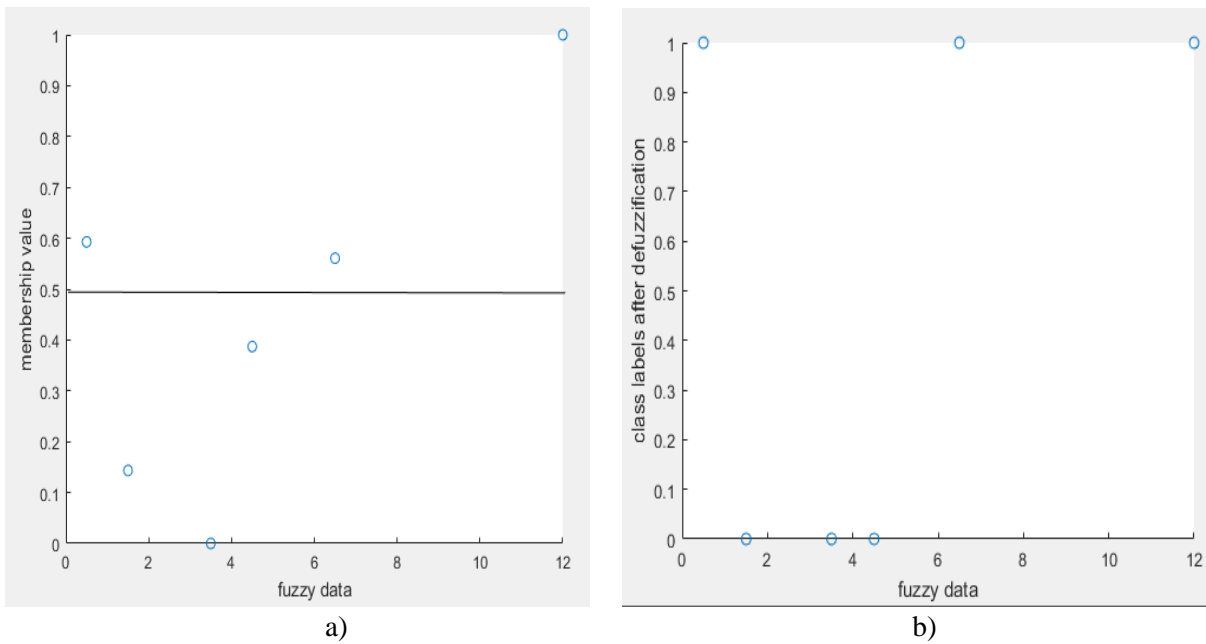


Figure 2. a) Membership values of fuzzy set and defuzzification using line  $y=0.5$  b) fuzzy data and labels after defuzzification.

We make binary classification and use just one discriminant line in defuzzification to get an accurate result. According to the problem structure, the number of classes can be increased by increasing the number of discriminant lines at the defuzzification stage. For this example the obtained accuracy for the test set (fuzzy set) is 83.33% where 5 out of 6 elements are classified correctly. Furthermore, 63.64% for the training set where 7 out of 11 elements are classified correctly.

Besides the presented example of the synthetic dataset, real-world datasets obtained from UCI Machine Learning Repository are applied to the defined algorithm. For comparison, the state of art classification algorithms is applied to the same datasets. Used dataset details are presented in Table 1, and obtained results are presented in Table 2.

Table 1. Details of real-world dataset

Datasets	Number of Instances	Number of Attributes
Vehicle	946	18
Ecoli	336	8
Iris	150	4
Haberman	306	3
Breast Cancer	286	9

The suggested algorithm code is written and implemented on matrix laboratory (MATLAB) program, and the state of art classification algorithms are implemented on Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) open-source machine learning software. For each experiment respectively 20% and 80% of the data is used for training and testing.

Table 2. Accuracy results of algorithms

Datasets	Fuzzy Classification	Naive Bayes	Logistics	Classification with Regression
Vehicle	69.81	64.54	94.83	92.9
Ecoli	85.9	91.44	88.74	86.23
Iris	96.00	100	100	100
Haberman	66.08	74.28	74.28	74.28
Breast Cancer	83.21	93.18	89.89	91.86

The results show that the suggested fuzzy classification is not the most effective in the state of art classification algorithms when it acts as a standard classifier that assigns a single crisp label. However, its success is not deniable, and it should not be forgotten that the novelty of this research is defining a new membership function. With this defined membership function, it can be determined which class the fuzzy data will be closer to.

For example, considering the disease processes, by using the available patient data (0-patient, 1-not patient), the sieges (disease proximity processes) can be considered as a cluster, and the cluster (process) of the fuzzy data can be estimated. Here for defining the cluster in step 6, the used equation should be changed according to the defined number of clusters (number of sieges).

## 5. Conclusion

This article aims to use fuzzy logic in classification by using accessible labeled data. In the supervised learning process, the previously defined PCFs approach for separation is applied, and the obtained PCFs define a novel membership function. For fuzzy classification, defuzzification is determined with the membership values. In order to measure performance during the test stages, binary classification is studied with the obtained membership values. However, according to the problem structure, the number of classes can be increased by increasing the number of discriminant lines at the defuzzification stage, and also suggested membership function can be used in fuzzy logic research for future work.

## Acknowledgments

This research has received no external funding.

## References

- Alpaydm, E. (2010). *Introduction to Machine Learning (2<sup>nd</sup> ed.)*. Cambridge, MA, USA: The MIT Press.
- Azam, M. H., Hasan, M. H., Kadir, S. J. A., & Hassan, S. (2021). Prediction of sunspots using fuzzy logic: A triangular membership function-based fuzzy C-means approach. *International*

- Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(2), 357-362.  
[doi:10.14569/IJACSA.2021.0120245](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120245)
- Bhattacharyya, R. & Mukherjee, S. (2020). Fuzzy membership function evaluation by non-linear regression: An algorithmic approach. *Fuzzy Information and Engineering*, 12(4), 412-434.  
[doi:10.1080/16168658.2021.1911567](https://doi.org/10.1080/16168658.2021.1911567)
- Borkar, S. & Rajeswari, K. (2013). Predicting students academic performance using education data mining. *IJCSMC International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2(7), 273-279.
- Cao, X. H., Stojkovic, I., & Obradovic, Z. (2016). A robust data scaling algorithm to improve classification accuracies in biomedical data. *BMC Bioinformatics*, 17(1), 359.  
[doi:10.1186/s12859-016-1236-x](https://doi.org/10.1186/s12859-016-1236-x)
- Gasimov, R. N., & Ozturk, G. (2006). Separation via polyhedral conic functions. *Optimization Methods and Software*, 21(4), 527-540. [doi:10.1080/10556780600723252](https://doi.org/10.1080/10556780600723252)
- Jamsandekar, S. & Mudholkar, R. R. (2014). Fuzzy classification system by self generated membership function using clustering technique. *International Journal of Information Technology*, 6(1), 697-704.
- Makrehchi, M. & Kamel, M. S. (2011). An information theoretic approach to generating fuzzy hypercubes for if-then classifiers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 22(1), 33-52.  
[doi:10.3233/IFS-2010-0472](https://doi.org/10.3233/IFS-2010-0472)
- Mendes, R. R. F., de Voznika, F. B., Freitas, A. A., & Nievola, J. C. (2001, September). *Discovering fuzzy classification rules with genetic programming and co-evolution*. Paper presented at Principles of Data Mining and Knowledge Discovery, PKDD 2001, Freiburg, Germany.  
[doi:10.1007/3-540-44794-6\\_26](https://doi.org/10.1007/3-540-44794-6_26)
- Ozturk, G., & Citfci, M. (2015). Clustering based polyhedral conic functions algorithm in classification. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 11(3), 921-932.  
[doi:10.3934/jimo.2015.11.921](https://doi.org/10.3934/jimo.2015.11.921)
- Rapheal, A. B. & Bhattacharya, S. (2020, January). *A Study on the effect of fuzzy membership function on fuzzified RIPPER for stock market prediction*. Paper presented at 4th International Conference on Machine Learning and Soft Computing, Copenhagen, Denmark.  
[doi:10.1145/3380688.3380716](https://doi.org/10.1145/3380688.3380716)
- Sanz, J., Fernandez, A., Bustince, H., & Herrera, F. (2010, July). *A genetic algorithm for tuning fuzzy rule-based classification systems with interval-valued fuzzy sets*. Paper presented at WCCI 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Barcelona, Spain.  
[doi:10.1109/FUZZY.2010.5584097](https://doi.org/10.1109/FUZZY.2010.5584097)
- Satı N. U. (2020). A novel semisupervised classification method via membership and polyhedral conic functions. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(1), 80-92.  
[doi:10.3906/elk-1905-45](https://doi.org/10.3906/elk-1905-45)
- Singh, H., Gupta, M. M., Meitzler, T., Hou, Z. G., Garg, K. K., Solo, A. M. G., & Zadeh, L. A. (2013). Real-life applications of fuzzy logic. *Advances in Fuzzy Systems*, 2013, 581879.  
[doi:10.1155/2013/581879](https://doi.org/10.1155/2013/581879)
- Uylaş Satı, N. (2015). A binary classification algorithm based on polyhedral conic functions. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(1), 152-161. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/dubited/issue/4809/66263>.
- Xie, W. B., Sang, S., Lam, H. K. & Zhang, J., (2021). A polynomial membership function approach for stability analysis of fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 29(8), 2077-2087. [doi:10.1109/TFUZZ.2020.2991149](https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.2991149)





Research Article

## Parameterized Differential Transform Method and Its Application to Boundary Value Transmission Problems

Merve YÜCEL\*<sup>1</sup>, Fahreddin S. MUHTAROV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hitit University, Faculty of Arts and Science, Mathematics Department 19040, Çorum, Türkiye

<sup>2</sup> Institute of Mathematics and Mechanics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan  
Merve YÜCEL, ORCID No: 0000-0001-7990-2821, Fahreddin S. MUHTAROV, ORCID No: 0000-0002-5482-2478

\*Corresponding author e-mail: merve.yucel@outlook.com.tr

### Article Info

Received: 16.07.2022  
Accepted: 20.03.2023  
Online August 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1143699](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1143699)

### Keywords

Boundary value problems,  
Differential transform  
method,  
Transmission conditions

**Abstract:** In this study, we developed a new modification of the well-known differential transform method (DTM) that differs from the classical one by the algorithm for calculating the coefficients of an approximate solution given as a series. The proposed new algorithm we will call  $\alpha$ -parameterized DTM ( $\alpha - p$  DTM, for short). By using the proposed  $\alpha - p$  DTM, we solve the boundary value transmission problem for the third-order differential equation. For the same problem, an approximate solution is also found using also the classical DTM. The solutions obtained were compared graphically.

## Parametrelı Diferansiyel Dönüşüm Yöntemi ve Sınır Değer Geçiş Problemlerine Uygulanması

### Makale Bilgileri

Geliş: 16.07.2022  
Kabul: 20.03.2023  
Online Ağustos 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1143699](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1143699)

### Anahtar Kelimeler

Diferansiyel dönüşüm  
yöntemi,  
Geçiş şartları,  
Sınır-değer problemleri

**Öz:** Bu çalışmada literatürden iyi bilinen diferansiyel dönüşüm yönteminin (DDY) yeni bir modifikasyonunu geliştirdik. Seri biçiminde verilmiş yaklaşık çözümde serinin katsayılarının hesaplanmasında uyguladığımız algoritma geleneksel DDY'den farklıdır. Önerdiğimiz yeni algoritmayı  $\alpha - p$  parametrelı diferansiyel dönüşüm yöntemi ( $\alpha - p$  DDY) olarak adlandırıyoruz. Geliştirdiğimiz  $\alpha - p$  DD yöntemi uygulayarak 3. mertebeden diferansiyel denklem için sınır değer geçiş probleminin yaklaşık çözümleri bulunmuştur. Aynı problemin başka bir yaklaşık çözümü, geleneksel DD yöntemi ile de bulunmuştur. Bulduğumuz sonuçlar grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

## 1. Introduction

Boundary value problems (BVPs, for short) for differential equations arise as a model of broad class of physical processes across of all areas of natural sciences. Different analytical methods are used to find the exact solutions to a particular type of linear differential equation. However, not all differential equations can be solved analytically. As a rule, purely analytical methods are not available for finding exact solutions to non-classical and singular boundary value problems. Therefore, various approximate

and numerical techniques, such as Adomian Decomposition Method (ADM), Finite Difference Method (FDM), Differential Transform Method (DTM), Variational Iterative Method (VIM), Homotopy Perturbation Method (HPM) etc. are effective tools to investigate and understand the qualitative properties of many differential equations with exact unknown solutions.

Many approximate and numerical methods are also not effective enough in solving various non-classical and/or singular problems since they may require complex algebraic calculations. However, the differential transform technique can provide useful approximate solutions for most regular BVPs and some non-classical singular BVPs because it is based on a simple algorithm. This simplest algorithm differs from others in that it does not require large computations of high-order derivatives of data functions.

Zhou (1986) first developed the differential transformation method to solve initial value problems when modelling electrical circuits. This method allows us to find an approximate, series or analytical solution in a closed form of various linear and non-linear differential equations. The usefulness is that this method reduces the given differential equation to simple iterative equations that are more convenient to study. Inspired by the works of Zhou, interest has increased in the development of various modifications and generalizations of DTM for solving a new type of boundary value problems that arise in modern problems of physics and other natural sciences (see, for example (Cakir & Arslan, 2015; Lal & Ahlawat, 2015; Mohamed & Gepreel, 2017; Ghazaryan et al., 2018; Pratiksha, 2019; Mukhtarov et al., 2019; Liu et al., 2020; Mukhtarov & Yücel, 2020; Hussein Msmali et al., 2021; Mukhtarov et al., 2021; Sowmya & Gireesha, 2022) and references therein).

In recent years, the application of DTM and its various modifications to the solutions of nonclassical initial and/or boundary value problems of a new type, which arise in solving many specific problems of physics and technology, has attracted great interest. Bekiryazici et al. (2020) developed a modification of the random DTM and demonstrated its applications to some models. Jena & Chakraverty (2018) proposed a new version of DTM to study free vibration of nanobeams. Khudair et al. (2016) investigated some second-order random differential equations by DTM. Ünal & Gökdoğan (2017) generalized DTM to solve not only classical differential equations but also fractional differential equations. Mirzaaghaian & Ganji (2016) examined the applicability of DTM to some physical problems such as heat transfer through permeable walls and micropolar fluid flow. Elsaïd & Helal (2020) developed a new modification of the DTM to calculate partial derivatives of nonlinear functions of two variables. They also used a different algorithm that does not require any intermediate calculations, which eliminates some of the shortcomings of many previous algorithms (Elsaïd & Helal, 2020). Odiibat et al. (2008) adapted the classical DTM in such a way that it could be applied not only to ordinary and partial differential equations but also fractional differential equations. Sepasgozar et al. (2017) applied DTM to find approximate solutions of momentum and heat transfer in a porous channel in a non-Newtonian fluid flow. Biazar & Eslami (2010), using differential transformation, numerically solved the telegraph equation. Karakoç & Bereketoğlu (2019) proposed a different version of DTM for solving delay differential equations. Ayaz (2004) defined a three-dimensional differential transformation for solving a system of differential equations. Mukhtarov et al. (2020) suggested a new generalization of DTM to investigate some spectral properties of a new type of boundary-value problem. Namely, they solved a new type of boundary value problem consisting of 2-interval differential equations and boundary-transmission conditions by developing a new differential transform (Mukhtarov et al., 2020). Biswas & Roy (2018) devoted the intuitionistic (fuzzy) differential transform method to solving Volterra-type fuzzy integrodifferential equations. Nazari & Shakmorad (2010) used the fractional DTM to solving fractional integro-differential equations under nonlocal BC's.

In this study, we proposed a new transform method (called  $\alpha$ -parameterized DTM) to solve boundary value transmission problems for two-interval differential equations.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Basic properties of differential transformation method

Let  $b = b(x)$  be any analytic function in some around of the point  $x = x_0$ . Then this function can be expanded in Taylor's series as

$$b(x) = \sum_{l=0}^{\infty} B_{x_0}(l) (x - x_0)^l \tag{1}$$

where  $B(l)$  is Taylor’s coefficient defined by

$$B_{x_0}(l) = \frac{1}{l!} \left[ \frac{d^l}{dx^l} b(x) \right]_{x=x_0}, \quad l = 0, 1, 2, \dots \tag{2}$$

**Definition 1.** The sequence  $B_{x_0}(0), B_{x_0}(1), B_{x_0}(2), \dots$  is said to be the differential transform of the analytic function  $b(x)$ , where  $B_{x_0}(l), l = 0, 1, 2, \dots$  is defined by Equation (2). The differential inverse transformation of the sequence  $(B_{x_0}(l))$  is defined by Equation (1). Here  $b(x)$  is said to be the original function and the sequence  $(B_{x_0}(l))$  is said to be the T-transform of  $b(x)$ .

Let us denote the T- transform of the original function  $b(x)$  by  $T_{x_0}(b)$ , and the differential inverse transform of  $(B_{x_0}(l))$  by  $T_{x_0}^{-1}(B_{x_0}(l))$ . From the definition of the T- transform it follows easily the following properties:

- i.  $T_{x_0}(a_1 + a_2) = T_{x_0}(a_1) + T_{x_0}(a_2)$
- ii.  $T_{x_0}(\gamma b) = \gamma T_{x_0}(b)$  for any  $\gamma \in \mathbb{R}$
- iii. If  $T_{x_0}(b) = (B_{x_0}(l))$ , then  $T_{x_0}\left(\frac{db}{dx}\right) = ((l + 1)B_{x_0}(l + 1))$  and  $T_{x_0}\left(\frac{d^2b}{dx^2}\right) = ((l + 1)(l + 2)B_{x_0}(l + 2))$
- iv. If  $T_{x_0}(a) = (A_{x_0}(l)), T_{x_0}(b) = (B_{x_0}(l))$  and  $T_{x_0}(ab) = (C_{x_0}(l))$ , then  $C_{x_0}(l) = (A_{x_0}(l) * B_{x_0}(l))$ , where  $A_{x_0}(l) * B_{x_0}(l)$  is denoted the convolution of the sequences  $A_{x_0}(l)$  and  $B_{x_0}(l)$ .

In a real application, the differential inverse transform  $T_{x_0}^{-1}(B_{x_0}(l))$  is defined by a finite sum

$$T_{x_0}^{-1}(B_{x_0}(l)) = \sum_{l=0}^s B_{x_0}(l) (x - x_0)^l \tag{3}$$

for sufficiently large  $s$ .

### 2.2. Definition and basic properties of the $\alpha$ – parameterized DTM

Let  $g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  be a real-valued analytic function and  $\alpha \in [0, 1]$  is a real number.

**Definition 1.** We say the sequence  $(T_\alpha(a, b))_n(g)$  is the  $\alpha$  – parameterized differential transform of the original function  $g(x)$  if

$$(T_\alpha(a, b))_n(g) := \alpha(T_a(g))_n + (1 - \alpha)(T_b(g))_n, \tag{4}$$

where

$$(T_a(g))_n := \frac{d^n g(a)}{n!}, \quad (T_b(g))_n := \frac{d^n g(b)}{n!}. \tag{5}$$

**Definition 2.** We say the function  $g(x)$  is the  $\alpha$  –inverse differential transform if

$$g_\alpha(x) := \sum_{n=0}^{\infty} (T_\alpha(a, b))_n(g) (x - (\alpha a + (1 - \alpha)b))^n \tag{6}$$

provided that the series is convergent. The  $\alpha$  –inverse differential transforms we shall denote by  $(T_\alpha^{-1}(a, b)_n)(g)$ .

**Definition 3.** The N-th partial sum of the series defined by Equation (6) is said to be N-th  $\alpha$ -parametrized approximation of the original function  $g(x)$  and is denoted by  $g_{\alpha,N}(x)$ , that is

$$g_{\alpha,N}(x) := \sum_{n=0}^N (T_\alpha(a, b))_n(g)(x - (\alpha a + (1 - \alpha)b))^n. \tag{7}$$

by using Definition 1 we can show that the  $\alpha$ - parameterized differential transform has the following properties:

1.  $(T_\alpha(a, b))_n(cg) = c(T_\alpha(a, b)(g))_n$
2.  $(T_\alpha(a, b))_n(f \pm g) = (T_\alpha(a, b))_n(f) \pm (T_\alpha(a, b))_n(g)$
3.  $(T_\alpha(a, b))_n\left(\frac{d^m g}{dx^m}\right) = \frac{(n+m)!}{n!} (T_\alpha(a, b))_n(g)$ .

### 3. Results

#### 3.1. Solution of transmission problems by using modified differential transformation method

Let us consider the 3rd-order differential equation,

$$\frac{d^3 u}{dx^3} - 2x \frac{du}{dx} - 2u = 0, \quad x \in \left[0, \frac{1}{2}\right) \cup \left(\frac{1}{2}, 1\right] \tag{8}$$

together with the boundary conditions,

$$u(0) = 1, \quad u(1) = 1, \quad \frac{du(0)}{dx} = 1 \tag{9}$$

and with the additional transmission conditions at the singular point  $x = \frac{1}{2}$ , given by

$$u\left(\frac{1}{2} + 0\right) = u\left(\frac{1}{2} - 0\right), \quad \frac{du\left(\frac{1}{2}+0\right)}{dx} = \frac{du\left(\frac{1}{2}-0\right)}{dx}, \quad \frac{d^2 u\left(\frac{1}{2}+0\right)}{dx^2} = \frac{1}{2} \frac{d^2 u\left(\frac{1}{2}-0\right)}{dx^2}. \tag{10}$$

Denote by  $U_0^-(k)$  and  $U_1^+(k)$  the T-transforms of the function  $u(x)$  at the end-points  $x = 0$  and  $x = 1$ , respectively. If DTM is applied to the differential equation in the left interval, at the point  $x = \frac{1}{2}$ , we have

$$(l + 1)(l + 2)(l + 3)U_0^-(l + 3) - 2 \sum_{r=0}^l U_0^-(l - r + 1)(l - r + 1)\delta(r - 1) - 2U_0^-(l) = 0 \tag{11}$$

where  $T^-(m) = \frac{1}{m!} \left[ \frac{d^m}{dx^m} u(x) \right]_{x=x_0}$ . The differential inverse transform in the left interval has the following form:

$$u^-(x) = \sum_{k=0}^n x^k U_0^-(k) = U_0^-(0) + xU_0^-(1) + x^2U_0^-(2) + \dots + x^{11}U_0^-(11). \tag{12}$$

The first boundary condition  $u(0) = 1$ , becomes  $U_0^-(0) = 1$ , and the second condition  $\frac{du(0)}{dx} = 1$ , becomes  $U_0^-(1) = 1$ . Let  $U_0^-(2) = a$ .

Now proceed with the iteration using Equation (11); we can calculate the other terms of the T- transform as

$$U_0^-(3) = \frac{1}{3}, \quad U_0^-(4) = \frac{1}{6}, \quad U_0^-(5) = \frac{a}{10}, \quad U_0^-(6) = \frac{1}{45}, \quad U_0^-(7) = \frac{1}{126},$$

$$U_0^-(8) = \frac{a}{280}, \quad U_0^-(9) = \frac{1}{1620}, \quad U_0^-(10) = \frac{1}{5670}, \quad U_0^-(11) = \frac{a}{15400}.$$
(13)

If we carry out the iteration up to  $n = 7$ , then we have the following approximation of the left solution:

$$u^-(x) = 1 + x + ax^2 + \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{6}x^4 + \left(\frac{a}{10}\right)x^5 + \frac{1}{45}x^6 + \frac{1}{126}x^7.$$
(14)

Secondly, let us get the solution for the problem in the right interval  $(\frac{1}{2}, 1]$ . If the differential transform method is applied to the differential equation, in the around of the point  $x_0 = 1$ , we have

$$(l + 1)(l + 2)(l + 3)U_1^+(l + 3) - 2(l + 1)U_1^+(l + 1) - 2lU_1^+(l) - 2U_1^+(l) = 0.$$
(15)

The differential inverse transform in the right interval  $(\frac{1}{2}, 1]$  has the following form:

$$u^+(x) = U_1^+(0) + (x - 1)U_1^+(1) + (x - 1)^2U_1^+(2) + \dots + (x - 1)^{11}U_1^+(11)$$
(16)

The third boundary condition  $u(1) = 1$ , becomes  $U_1^+(0) = 1$ . Let us  $U_1^+(1) = b$  and  $U_1^+(2) = c$ . By using Equation (15), we find

$$U_1^+(3) = \frac{1}{3}(b + 1), \quad U_1^+(4) = \frac{b}{6} + \frac{c}{6}, \quad U_1^+(5) = \frac{1}{10}\left(\frac{1}{3}(b + 1) + c\right),$$

$$U_1^+(6) = \frac{1}{120}\left(\frac{4c}{3} + 4b + \frac{8}{3}\right), \quad U_1^+(7) = \frac{1}{21}\left(\frac{6b + 8c + 1}{30}\right), \dots$$
(17)

Now, applying differential inverse transform for  $n = 7$ , we have

$$u^+(x) = 1 + (x - 1)b + (x - 1)^2c + (x - 1)^3\frac{1}{3}(b + 1) + (x - 1)^4\left(\frac{b}{6} + \frac{c}{6}\right)$$

$$+ (x - 1)^5\frac{1}{10}\left(\frac{1}{3}(b + 1) + c\right) + (x - 1)^6\frac{1}{120}\left(\frac{4c}{3} + 4b + \frac{8}{3}\right)$$

$$+ (x - 1)^7\frac{1}{21}\left(\frac{6b + 8c + 1}{30}\right).$$
(18)

Substituting Equations (14)-(18) in the transmission conditions

$$u\left(\frac{1}{2} + 0\right) = u\left(\frac{1}{2} - 0\right), \quad \frac{du\left(\frac{1}{2} + 0\right)}{dx} = \frac{du\left(\frac{1}{2} - 0\right)}{dx}, \quad \frac{d^2u\left(\frac{1}{2} + 0\right)}{dx^2} = \frac{1}{2} \frac{d^2u\left(\frac{1}{2} - 0\right)}{dx^2},$$
(19)

we can find,  $a = -1.49383$ ,  $b = -0.426463$ ,  $c = -0.0391322$ .

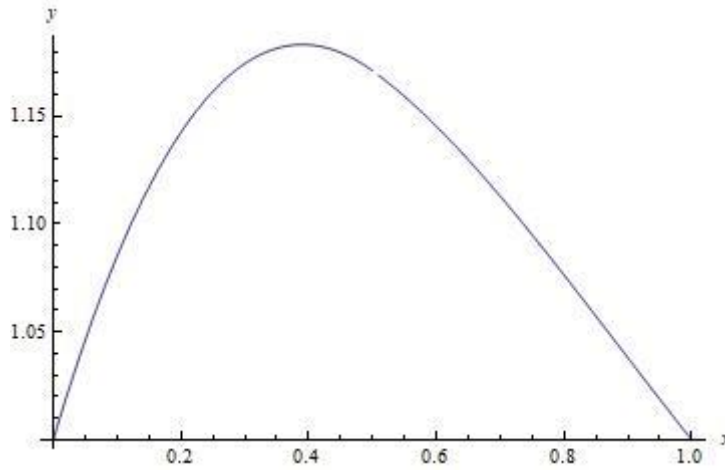


Figure 1. Graph of the classical DTM solution in the  $[0, \frac{1}{2}) \cup (\frac{1}{2}, 1]$ .

### 3.2. Application of the $\alpha - p$ DTM and comparison with the classical DTM

Consider the differential equation

$$\frac{d^3u}{dx^3} - 2x \frac{du}{dx} - 2u = 0, \quad x \in \left[0, \frac{1}{2}\right) \cup \left(\frac{1}{2}, 1\right] \tag{20}$$

subject to the boundary conditions

$$u(0) = 1, \quad u(1) = 1, \quad \frac{du(0)}{dx} = 1 \tag{21}$$

and additional transmission conditions at the point of interaction  $x = \frac{1}{2}$ , given by

$$u\left(\frac{1}{2} + 0\right) = u\left(\frac{1}{2} - 0\right), \quad \frac{du\left(\frac{1}{2} + 0\right)}{dx} = \frac{du\left(\frac{1}{2} - 0\right)}{dx}, \quad \frac{d^2u\left(\frac{1}{2} + 0\right)}{dx^2} = \frac{1}{2} \frac{d^2u\left(\frac{1}{2} - 0\right)}{dx^2}. \tag{22}$$

Taking the  $\alpha - p$  DT of the Equation (20) on the interval  $[0, \frac{1}{2})$  we obtain

$$T(u, \alpha; m + 3) = \frac{1}{(m + 1)(m + 2)(m + 3)} \left[ 2 \sum_{r=0}^m T(u, \alpha; m - r + 1)(k - r + 1)\delta(r - 1) + 2T(u, \alpha; m) \right] \tag{23}$$

where  $T(u, \alpha; m)$  is defined by  $T(u, \alpha; m) := T_\alpha\left(0, \frac{1}{2}\right)_m(u)$ .

Using the boundary conditions becomes

$$u_{l, \alpha, N}(0) = \sum_{k=0}^N T(u, \alpha; k) \left(\frac{\alpha - 1}{2}\right)^k = 1 \tag{24}$$

$$u'_{l, \alpha, N}(0) = \sum_{k=0}^N T(u, \alpha; k) k \left(\frac{\alpha - 1}{2}\right)^{k-1} = 1. \tag{25}$$

Denoting  $T(u, \alpha; 0) = \mathcal{A}$ ,  $T(u, \alpha; 1) = \mathcal{B}$  and  $T(u, \alpha; 2) = \mathcal{C}$  then substituting in the recursive Equation (23), we get



$$T(u, \alpha; 3) = \frac{2\mathcal{A}}{3!} \tag{26}$$

Now proceeding the iteration using Equation (23) we can calculate the other terms of the  $\alpha$  –parameterized sequence  $T(u, \alpha; n)$  as

$$\begin{aligned} T(u, \alpha; 4) &= \frac{\mathcal{B}}{3!}, & T(u, \alpha; 5) &= \frac{\mathcal{C}}{10}, & T(u, \alpha; 6) &= \frac{\mathcal{A}}{45}, \\ T(u, \alpha; 7) &= \frac{\mathcal{B}}{126}, & T(u, \alpha; 8) &= \frac{\mathcal{C}}{280}, & & \dots \end{aligned} \tag{27}$$

Hence, the left  $\alpha$  –parameterized series solution  $u_l(x, \alpha)$  is evaluated up to  $N = 7$ :

$$\begin{aligned} u_l(x, \alpha) &= \sum_{k=0}^7 D_l(u, \alpha; k) \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^k \\ &= \mathcal{A} + \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right) \mathcal{B} + \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^2 \mathcal{C} + \frac{1}{3} \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^3 \mathcal{A} \\ &\quad + \frac{1}{6} \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^4 \mathcal{B} + \frac{1}{10} \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^5 \mathcal{C} + \frac{1}{45} \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^6 \mathcal{A} \\ &\quad + \frac{1}{126} \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^7 \mathcal{B} + \frac{1}{280} \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^8 \mathcal{C} + \frac{1}{1620} \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^9 \mathcal{A} \\ &\quad + \frac{1}{5670} \left(x - \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\right)^{10} \mathcal{B} + \dots \end{aligned} \tag{28}$$

where  $x_\alpha = \frac{1-\alpha}{2}$  and  $T(u, \alpha; 0) = \mathcal{A}$ ,  $T(u, \alpha; 1) = \mathcal{B}$  and  $T(u, \alpha; 2) = \mathcal{C}$ .

Now we will consider the problem Equations (20)-(22) on the right interval  $\left(\frac{1}{2}, 1\right]$ . Being in a similar way we obtain

$$D_r(u, \alpha; k + 3) = \frac{1}{(k + 1)(k + 2)(k + 3)} \left[ 2 \sum_{r=0}^k D_r(u, \alpha; k - r + 1) (k - r + 1) \delta(r - 1) + 2D_r(u, \alpha; k) \right] \tag{29}$$

Denoting  $D_r(u, \alpha; 0) = \mathcal{D}$ ,  $D_r(u, \alpha; 1) = \mathcal{E}$  and  $D_r(u, \alpha; 2) = \mathcal{F}$  then substituting in the recursive Equation (29), we have

$$D_r(u, \alpha; 3) = \frac{\mathcal{D}}{3} \tag{30}$$

Now proceeding the iteration using Equation (29) we can calculate the other terms of the  $\alpha$  –parameterized sequence  $D_r(u, \alpha; n)$  as

$$\begin{aligned} D_r(u, \alpha; 4) &= \frac{\mathcal{E}}{3!}, & D_r(u, \alpha; 5) &= \frac{\mathcal{F}}{10}, & D_r(u, \alpha; 6) &= \frac{\mathcal{D}}{45}, & D_r(u, \alpha; 7) &= \frac{\mathcal{E}}{126}, \\ D_r(u, \alpha; 8) &= \frac{\mathcal{F}}{280}, & D_r(u, \alpha; 9) &= \frac{\mathcal{D}}{1620}, & D_r(u, \alpha; 10) &= \frac{\mathcal{E}}{5670}, & & \dots \end{aligned} \tag{31}$$

Hence the  $\alpha$  –parameterized series solution  $u_r(x, \alpha)$  is evaluated up to  $N = 7$ :

$$\begin{aligned}
 u_r(x, \alpha) &= \sum_{k=0}^7 D_r(u, \alpha; k) \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^k \\
 &= \mathcal{D} + \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right) \mathcal{E} + \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^2 \mathcal{F} + \frac{1}{3} \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^3 \mathcal{D} \\
 &\quad + \frac{1}{3!} \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^4 \mathcal{E} + \frac{1}{10} \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^5 \mathcal{F} + \frac{1}{45} \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^6 \mathcal{D} \\
 &\quad + \frac{1}{126} \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^7 \mathcal{E} + \frac{1}{280} \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^8 \mathcal{F} + \frac{1}{1620} \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^9 \mathcal{D} \\
 &\quad + \frac{1}{5670} \left(x - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)^{10} \mathcal{E}
 \end{aligned} \tag{32}$$

where  $x_\alpha = \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$  and  $D_r(y, \alpha; 0) = \mathcal{D}$ ,  $D_r(y, \alpha; 1) = \mathcal{E}$ ,  $D_r(y, \alpha; 2) = \mathcal{F}$ .

Using the boundary condition  $u(1) = 1$  becomes

$$\begin{aligned}
 \mathcal{D} + \frac{\alpha}{2} \mathcal{E} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \mathcal{F} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^3 \frac{\mathcal{D}}{3} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^4 \frac{\mathcal{E}}{3!} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^5 \frac{\mathcal{F}}{10} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^6 \frac{\mathcal{D}}{45} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^7 \frac{\mathcal{E}}{126} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^8 \frac{\mathcal{F}}{280} \\
 + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^9 \frac{\mathcal{D}}{1620} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{10} \frac{\mathcal{E}}{5670} = 1.
 \end{aligned} \tag{33}$$

By using the transmission conditions,

$$u_l\left(\frac{1}{2}\right) = u_r\left(\frac{1}{2}\right), \quad \frac{du_l\left(\frac{1}{2}\right)}{dx} = \frac{du_r\left(\frac{1}{2}\right)}{dx}, \quad \frac{d^2u_l\left(\frac{1}{2}\right)}{dx^2} = 2 \frac{d^2u_r\left(\frac{1}{2}\right)}{dx^2}. \tag{34}$$

We can obtain the values of the auxiliary parameters  $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}, \mathcal{D}, \mathcal{E}$  and  $\mathcal{F}$ .

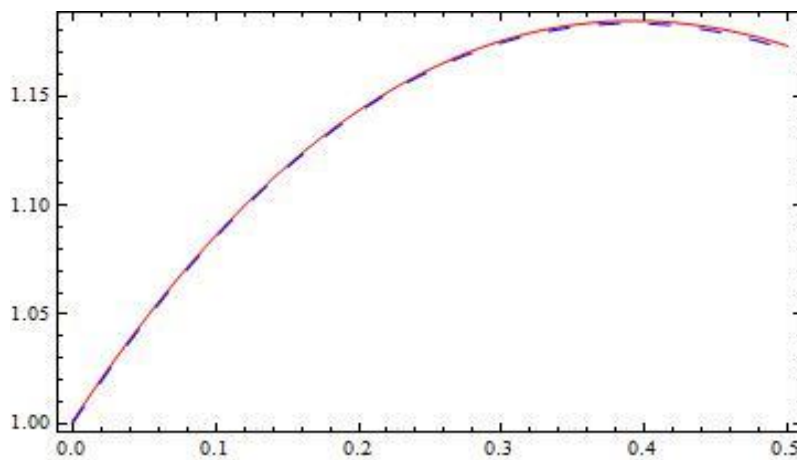


Figure 2. Comparison of the DTM solution (blue line) and the  $\alpha$  –parameterized DT solution for  $\alpha = \frac{999}{1000}$  (red line) on the left interval  $\left[0, \frac{1}{2}\right)$ .

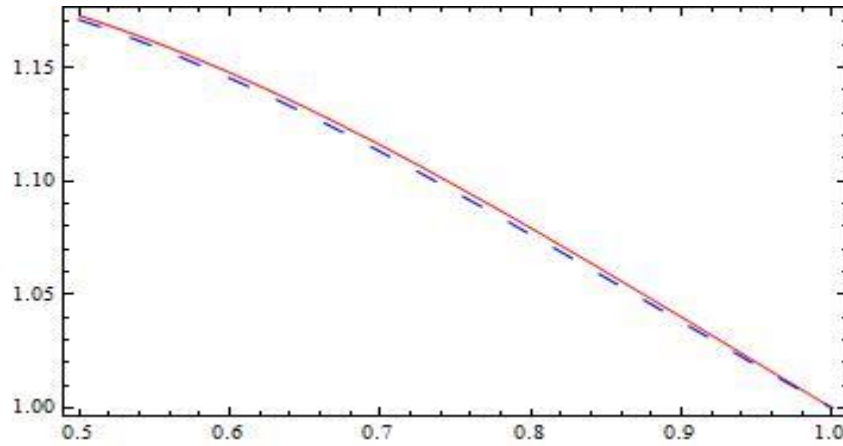


Figure 3. Comparison of the DTM solution (blue line) and the  $\alpha$  –parameterized DT solution for  $\alpha = \frac{999}{1000}$  (red line) on the left interval  $(\frac{1}{2}, 1]$ .

**3.3. Solution of nonlinear boundary value problem by  $\alpha - p$  DTM and comparison with the exact solution**

Let us consider the following illustrative nonlinear boundary value problem,

$$u'' + (u')^2 = 0, \quad x \in [0,1] \tag{35}$$

$$u(0) = 1, \quad u(1) = 0. \tag{36}$$

By applying the  $\alpha - p$  DTM to the nonlinear differential Equation (18) we have

$$(T_\alpha(0,1))_{m+2}(u) = \frac{-1}{(m+1)(m+2)} \left[ \sum_{r=0}^m \alpha(r+1)(T_0(u))_{r+1} (m-r+1)(T_0(u))_{m-r+1} \right. \\ \left. + (1-\alpha)(r+1)(T_1(u))_{r+1}(m-r+1)(T_1(u))_{m-r+1} \right] \tag{37}$$

Using the boundary conditions Equation (36) we have  $(T_0(u))_0 = 1, (T_1(u))_0 = 0$   
 Denoting  $(T_0(u))_1$  and  $(T_1(u))_1$  by A and B respectively and then substituting in the iterative Equation (37) we get

$$(T_\alpha(0,1))_2 = \alpha \left( \frac{-A^2}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{-B^2}{2} \right), (T_\alpha(0,1))_3 = \alpha \left( \frac{A^3}{3} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{B^3}{3} \right), \\ (T_\alpha(0,1))_4 = \alpha \left( \frac{-A^4}{4} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{-B^4}{4} \right), (T_\alpha(0,1))_5 = \alpha \left( \frac{A^5}{5} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{B^5}{5} \right), \dots \tag{38}$$

Proceeding the iteration in the similar way we can compute the other terms of the  $\alpha - p$  DTM solution. Then we get the following  $\alpha - p$  DTM solution in the form of a series. Hence the  $\alpha$  –parametrized series solution  $u(x, \alpha)$  is evaluated:

$$\begin{aligned}
 u_{\alpha}(x) &= \sum_{k=0}^{\infty} (T_{\alpha}(0,1))_k (x - x_{\alpha})^k \\
 &= \alpha + (\alpha A + (1 - \alpha)B)(x - (1 - \alpha))^1 \\
 &\quad + \left[ \alpha \left( \frac{-A^2}{2} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{-B^2}{2} \right) \right] (x - (1 - \alpha))^2 \\
 &\quad + \left[ \alpha \left( \frac{A^3}{3} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{B^3}{3} \right) \right] (x - (1 - \alpha))^3 + \dots
 \end{aligned} \tag{39}$$

Substituting N-th partial sum of this series into the boundary conditions Equation (36) we can obtain the parameters A and B. It is easy to verify that the exact solution of the nonlinear boundary value problem Equations (35), (36) is

$$u(x) = 1 + \ln \left( 1 - \frac{e - 1}{e} x \right). \tag{40}$$

In the following figure we have compared the approximate  $\alpha - p$  DTM solution

$$u_{\alpha,N}(x) = \sum_{k=0}^N (T_{\alpha}(0,1))_k (x - (1 - \alpha))^k \tag{41}$$

with the exact solution defined by Equation (40) for  $N = 20$  and  $\alpha = \frac{1}{1000}$ .

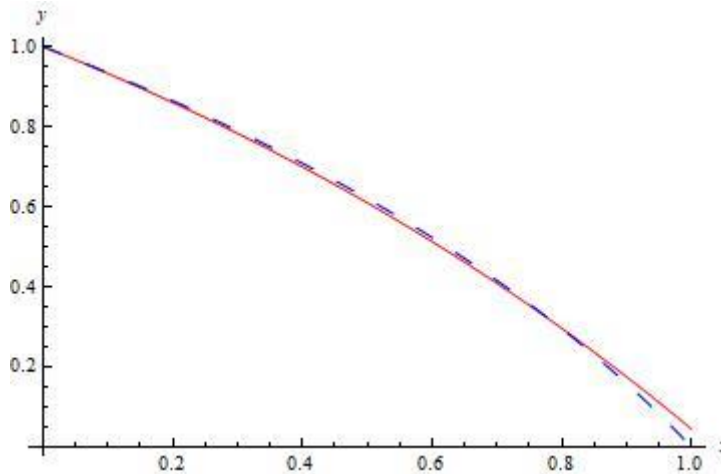


Figure 4. Comparison of the exact solution (blue line) and the  $\alpha - p$  parameterized DT solution for  $\alpha = \frac{1}{1000}$  (red line).

#### 4. Discussion and Conclusion

In this work, we proposed a new generalization of the classical DTM, which we called as  $\alpha - p$  parameterized DTM ( $\alpha - p$  DTM). Then by applying  $\alpha - p$  DTM we get an approximate  $\alpha - p$  DTM solutions of the third order linear boundary value transmission problem and the second order non-linear boundary value problem. The results obtained are illustrated graphically in Figures 3 and 4. Moreover the approximate  $\alpha - p$  DTM solution of the nonlinear BVP were compared graphically with the exact solution of the same problem. Note that the proposed  $\alpha - p$  DTM is reduced to the classical DTM for the special cases  $\alpha = 0$  and  $\alpha = 1$ , so the proposed  $\alpha - p$  DTM is the generalization of the classical DTM.

## References

- Ayaz, F. (2004). Solution of the system of differential equations by differential transform method. *Applied Mathematics and Computation*, 147(2), 547-567. doi:10.1016/S0096-3003(02)00794-4
- Bekiryazici, Z., Merdan, M., & Kesemen, T. (2021). Modification of the random differential transformation method and its applications to compartmental models. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 50(18), 4271-4292. doi:10.1080/03610926.2020.1713372
- Biazar, J., & Eslami M. (2010). Analytic solution for telegraph equation by differential transform method. *Physics Letters A*, 374(29), 2904-2906. doi:10.1016/j.physleta.2010.05.012
- Biswas, S., & Roy, T. K. (2018). Generalization of Seikkala derivative and differential transform method for fuzzy Volterra integro-differential equations. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(4), 2795-2806. doi:10.3233/JIFS-17958
- Cakir, M., & Arslan, D. (2015). The Adomian decomposition method and the differential transform method for numerical solution of multi-pantograph delay differential equations. *Applied Mathematics*, 6(8), 1332. doi:10.4236/am.2015.68126
- Elsaid, A. & Helal, S. M. (2020). A new algorithm for computing the differential transform in nonlinear two-dimensional partial differential equations. *Journal of King Saud University-Science*, 32(1), 858-861. doi:10.1016/j.jksus.2019.04.004
- Ghazaryan, D., Burlayenko, V. N., Avetisyan, A., & Bhaskar, A. (2018). Free vibration analysis of functionally graded beams with non-uniform cross-section using the differential transform method. *Journal of Engineering Mathematics*, 110(1), 97-121. doi:10.1007/s10665-017-9937-3
- Hussein Msmali, A., Alotaibi, A. M., El-Moneam, M. A., Badr, B. S., & Ahmadini, A. A. H. (2021). A general scheme for solving systems of linear first-order differential equations based on the differential transform method. *Journal of Mathematics*, 2021, 8839201. doi:10.1155/2021/8839201
- Jena, S. K., & Chakraverty, S. (2018). Free vibration analysis of Euler–Bernoulli nanobeam using differential transform method. *International Journal of Computational Materials Science and Engineering*, 7(3), 1850020. doi:10.1142/S2047684118500203
- Karakoç, F., & Bereketoğlu, H. (2009). Solutions of delay differential equations by using differential transform method. *International Journal of Computer Mathematics*, 86(5), 914-923. doi:10.1080/00207160701750575
- Khudair, A. R., Haddad, S. A. M., & Khalaf, S. L. (2016). Mean square solutions of second-order random differential equations by using the differential transformation method. *Open Journal of Applied Sciences*, 6(4), 287-297. doi:10.4236/ojapps.2016.64028
- Lal, R., & Ahlawat, N. (2015). Axisymmetric vibrations and buckling analysis of functionally graded circular plates via differential transform method. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 52, 85-94. doi:10.1016/j.euromechsol.2015.02.004
- Liu, J. G., Yang, X. J., Feng, Y. Y., & Cui, P. (2020). On the  $(N+1)$ -dimensional local fractional reduced differential transform method and its applications. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 43(15), 8856-8866. doi:10.1002/mma.6577
- Mirzaaghaian, A., & Ganji, D. D. (2016). Application of differential transformation method in micropolar fluid flow and heat transfer through permeable walls, *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2183-2191. doi:10.1016/j.aej.2016.06.011
- Mohamed, M. S., & Gepreel, K. A. (2017). Reduced differential transform method for nonlinear integral member of Kadomtsev–Petviashvili hierarchy differential equations. *Journal of the Egyptian Mathematical Society*, 25(1), 1-7. doi:10.1016/j.joems.2016.04.007
- Mukhtarov, O., Çavuşoğlu, S., & Olğar, H. (2019). Numerical solution of one boundary value problem using finite difference method. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, 11, 85-89.
- Mukhtarov, O. S., & Yücel, M. (2020). A study of the eigenfunctions of the singular Sturm–Liouville problem using the analytical method and the decomposition technique. *Mathematics*, 8(3), 415. doi:10.3390/math8030415

- Mukhtarov, O. S., Yücel, M., & Aydemir, K. (2020). Treatment a new approximation method and its justification for Sturm–Liouville problems. *Complexity*, 2020, 8019460. doi:10.1155/2020/8019460
- Mukhtarov, O., Yücel, M., & Aydemir, K. (2021). A new generalization of the differential transform method for solving boundary value problems. *Journal of New Results in Science*, 10(2), 49-58.
- Nazari, D., & Shahmorad, S. (2010). Application of the fractional differential transform method to fractional-order integro-differential equations with nonlocal boundary conditions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 234(3), 883-891. doi:10.1016/j.cam.2010.01.053
- Odibat, Z., Momani, S., & Ertürk, V. S. (2008). Generalized differential transform method: Application to differential equations of fractional order. *Applied Mathematics and Computation*, 197(2), 467-477. doi:10.1016/j.amc.2007.07.068
- Pratiksha, A. G. (2019). A cumulative study on differential transform method. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 4(1), 170-181. doi:10.33889/IJMEMS.2019.4.1-015
- Sepasgozar, S., Faraji, M., & Valipour, P. (2017). Application of differential transformation method (DTM) for heat and mass transfer in a porous channel. *Propulsion and Power Research*, 6(1), 41-48. doi:10.1016/j.jprr.2017.01.001
- Sowmya, G., & Gireesha, B. J. (2022). Analysis of heat transfer through different profiled longitudinal porous fin by differential transformation method. *Heat Transfer*, 51(2), 2165-2180. doi:10.1002/htj.22394
- Ünal, E., & Gökdoğan, A. (2017). Solution of conformable fractional ordinary differential equations via differential transform method. *Optik*, 128, 264-273. doi:10.1016/j.ijleo.2016.10.031
- Zhou, J. K. (1986). *Differential transformation and its applications for electrical circuits*. Wuhan, China: Huazhong University Press.





Research Article

## Cofinitely Semisimple (ss-) Lifting Modules

**Figen ERYILMAZ**

Ondokuz Mayıs University, Faculty of Education, Department of Mathematics Education, 55270, Samsun, Türkiye

Figen ERYILMAZ, ORCID No: 0000-0002-4178-971X

Corresponding author e-mail: fyuzbasi@omu.edu.tr

### Article Info

Received: 13.07.2022  
Accepted: 03.04.2023  
Online August 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1143435](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1143435)

**Abstract:** A  $P$ -module  $N$  is named cofinitely semisimple lifting or briefly cofinitely  $ss$ -lifting, if for each cofinite submodule  $S$  of  $N$ ,  $N$  has a decomposition  $N = U' \oplus V$  where  $U' \subseteq S$  and  $S \cap V \subseteq Soc_s(V)$ . In this study, identical conditions to this definition are given. In addition, the basic features of this concept defined in this article are examined.

### Keywords

Cofinitely  $ss$ -lifting module,  
 $ss$ -supplemented module,  
Semisimple module

## Dual Sonlu Yarı Basit Yükseltilebilir Modüller

### Makale Bilgileri

Geliş: 13.07.2022  
Kabul: 03.04.2023  
Online Ağustos 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1143435](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1143435)

**Öz:**  $N, P$ -modülünün dual sonlu her  $S$  alt modülü  $N = U' \oplus V$ ,  $U' \subseteq S$  ve  $S \cap V \subseteq Soc_s(V)$  olacak şekilde bir ayrışma sahip ise  $N$  modülüne dual sonlu yarı basit yükseltilebilir modül veya kısaca dual sonlu  $ss$ -yükseltilebilir modül denir. Bu çalışmada, bu tanıma denk koşullar verilmiştir. Buna ek olarak, makalede tanımlanan bu kavramın basit özellikleri incelenmiştir.

### Anahtar Kelimeler

Dual sonlu  $ss$ -yükseltilebilir modül,  
 $ss$ -tümlemiş modül,  
Yarı basit modül

## 1. Introduction

In this article, whole rings must be with identity and whole modules are taken as unitary left modules. Let  $P$  and  $N$  be a ring and a module with the given property, respectively. By the notation  $S \leq N$ , we will imply that  $S$  is a submodule of  $N$ . The submodule  $S$  of  $N$  is named *small* in  $N$  if  $N \neq S + T$  for any proper submodule  $T$  of  $N$ , indicated by  $S \square N$ , and we point the sum of whole small submodules of it with  $Rad(N)$ . Dual to this concept, the submodule  $S$  of  $N$  is named

essential in  $N$ , indicated by  $S \ll N$ , if the intersection of  $S$  with the other submodules of  $N$  is non-zero except for  $\{0\}$ . A supplement submodule  $T$  of  $S$  in  $N$  is a minimal element of the set  $\{Y \leq N \mid N = S + Y\}$  that is equivalent to  $N = S + T$  and  $S \cap T \ll T$ . Any module  $N$  is named *supplemented*, if each submodule of  $N$  has a supplement in  $N$  (Wisbauer, 1991). Otherwise, the module  $N$  is *amply supplemented*, if for each submodules  $S$  and  $S'$  of  $N$  with  $N = S + S'$ , it can be found a supplement  $T$  of  $S$  where  $T \leq S'$  (Wisbauer, 1991).

According to Mohamed & Müller (1990), any module  $N$  is named *lifting* if each submodule  $S$  of  $N$  lies over a direct summand, i.e., there is a decomposition  $N = T_1 \oplus T_2$  such that  $T_1 \leq S$  and  $S \cap T_2 \ll T_2$ . By Wisbauer (1991),  $N$  is lifting if and only if  $N$  is amply supplemented and each supplement submodule of  $N$  is a direct summand of  $N$ . Lifting modules have been studied by many authors such as (Keskin, 2000; Tribak, 2008; Wang & Wu, 2010).

Following Zhou & Zhang (2011), the sum of whole simple submodules of  $N$  which are small in  $N$  is indicated by  $Soc_s(N)$ , i.e.,  $Soc_s(N) = \sum \{S \leq N \mid S \text{ is simple}\}$ . Obviously  $Soc_s(N) \subseteq Rad(N)$  and  $Soc_s(N) \subseteq Soc(N)$ .

Besides these, semisimple supplemented (ss-) and semisimple (ss-) lifting modules are introduced by Kaynar et al. (2020) and Eryılmaz (2021), respectively. Let  $N$  be a module and  $S, B \leq N$ . If  $N = S + B$  and  $S \cap B \subseteq Soc_s(B)$ , then  $B$  is a *semisimple supplement* of  $S$  in  $N$ . Any module  $N$  is called *semisimple* (or briefly *ss-*) *supplemented*, if each submodule  $S$  of  $N$  have a semisimple supplement  $B$  in  $N$ . As a result of this definition, a finitely generated module  $N$  is semisimple supplemented iff  $N$  is supplemented and  $Rad(N) \subseteq Soc(N)$ . According to Eryılmaz (2021), a module  $N$  is called *semisimple* (or briefly *ss-*) *lifting*, if each submodule  $S$  of  $N$ , we have a decomposition  $N = T_1 \oplus T_2$  where  $T_1 \leq S$ ,  $S \cap T_2 \ll T_2$  and  $S \cap T_2$  is semisimple. Some fundamental properties of semisimple lifting modules are examined in this paper. Another version of these modules is studied in Türkmen & Türkmen (2020) and Sözen (2022).

Based on the definitions found in the literature, we can define cofinitely semisimple lifting modules. A module  $N$  is called a cofinitely semisimple lifting (or briefly cofinitely *ss-*) if for each cofinite submodule  $S$  of  $N$ , there is a direct summand  $T$  of  $N$  where  $T \leq S$  and  $\frac{S}{T} \subseteq Soc_s\left(\frac{N}{T}\right)$ . Equivalent conditions to our definition are given in Theorem 3. It is proved that each  $\pi$ -projective and cofinitely semisimple supplemented module is cofinitely semisimple lifting. We will show that for a ring  $P$ ,  ${}_P P$  is cofinitely semisimple lifting if and only if  $P$  is semiperfect with  $Rad(P) \subseteq Soc({}_P P)$ .

## 2. Results

### 2.1. Cofinitely semisimple (ss-) lifting modules

Now, we will examine some new properties of cofinitely semisimple lifting modules.

**Definition 1.** A module  $N$  is named cofinitely semisimple lifting if for each cofinite submodule  $S$  of  $N$ ,  $N$  has a decomposition  $N = U' \oplus V$  where  $U' \subseteq S$ ,  $V \leq N$  and  $S \cap V \subseteq Soc_s(V)$ .

Since each submodule of a finitely generated module is cofinite, the concepts of semisimple lifting and cofinitely semisimple lifting modules overlap in finitely generated modules. Each semisimple lifting module is cofinitely semisimple lifting. However, the following example emphasizes that the converse is not valid.

**Example 2.** Assume that  $P$  is a Dedekind domain and is not a field. Let  $X$  be the field of fractions of  $P$ ,  $J$  be an infinite index set and  $N$  be the  $P$ -module  $X^{(J)}$ . Then,  $N$  has not a maximal submodule, and so  $N$  is the only cofinite submodule of  $N$ . Therefore it is cofinitely semisimple lifting. By Theorem 2.4 and 3.1 in Zöschinger (1974),  $N$  is not semisimple lifting.

**Theorem 3.** Let  $N$  be a module. For any cofinite submodule  $S$  of  $N$ , the following conditions are equivalent:

- (1) There is a direct summand  $T$  of  $N$  where  $T \leq S$  and  $\frac{S}{T} \subseteq Soc_s\left(\frac{N}{T}\right)$ .
- (2) It can be found a submodule  $U$  of  $N$  and a direct summand  $T$  of  $N$  where  $T \leq S$ ,  $S = T + U$  and  $U \subseteq Soc_s(N)$ .
- (3) There is a decomposition  $N = T \oplus S'$  with  $T \subseteq S$  and  $S' \cap S \subseteq Soc_s(N)$ .
- (4)  $S$  has a semisimple supplement  $S'$  in  $N$  where  $S' \cap S$  is a direct summand in  $S$ .
- (5) There is a homomorphism  $f : N \rightarrow N$  with  $f^2 = f$  where  $f(N) \subseteq S$  and  $(1-f)(S) \subseteq Soc_s(1-f)(N)$ .

Proof. (1)  $\Rightarrow$  (2) Since  $T$  is a direct summand of  $N$ , it can be found a submodule  $S'$  of  $N$  with  $N = T \oplus S'$ . Taking the intersection of both sides of the equation with  $S$ , we get that  $S = T + (S' \cap S)$ . Since  $\frac{S}{T} \square \frac{N}{T}$  and  $\frac{S}{T}$  is semisimple, it can be written that  $\Psi\left(\frac{S}{T}\right) = S' \cap T \square T$  and  $S' \cap S$  is semisimple where  $\Psi : N \rightarrow T$  is the canonical projection.

(2)  $\Rightarrow$  (3) According to the assumption, we have  $N = T \oplus S'$  for some submodule  $S'$  of  $N$ . Then  $S'$  is semisimple supplement of  $T$  in  $N$  and so the semisimple supplement of  $S = T + U$  in  $N$  by Lemma 22 in Kaynar et al. (2020). Therefore  $S' \cap S \subseteq Soc_s(S')$ .

(3)  $\Rightarrow$  (4) Taking the intersection of both sides of the equation  $N = T \oplus S'$  with  $S$ , we can write  $S = T \oplus (S' \cap S)$ . Hence  $S'$  is a semisimple supplement of  $S$  in  $N$ .

(4)  $\Rightarrow$  (5) By the assumption, we have  $N = S + S'$ ,  $S' \cap S \subseteq Soc_s(S')$  and  $S = (S' \cap S) \oplus T$  for some  $T \subseteq S$ . Then  $N = S + S' = (S' \cap S) + T + S' = T + S'$ ,  $(S' \cap S) \cap T = 0$  and  $N = T + S'$ . If we take  $f : N \rightarrow N$  as a projection where  $f(n) = t, n = t + s, t \in T, s \in S'$ , then  $f(N) \subseteq T \subseteq S$ . Since  $(1-f)(N) = S'$ , we can easily get that  $(1-f)(S) = S' \cap S \square S' = (1-f)(N)$  and  $S' \cap S$  is semisimple.

(5)  $\Rightarrow$  (1) Suppose that  $T = f(N)$ . Then we can obtain that  $N = f(N) \oplus (1-f)(N)$  because  $f$  is an idempotent. Thus  $N = T \oplus (1-f)(N)$  with  $T \subseteq S$ . If we consider the isomorphism  $\Phi : \frac{N}{T} \rightarrow (1-f)(N)$ , then we get  $\Phi\left(\frac{S}{T}\right) = (1-f)(S) \square (1-f)(N) = \Phi\left(\frac{N}{T}\right)$ . As  $\Phi^{-1}$  is an isomorphism and  $\frac{S}{T} \square \frac{N}{T}$ , it is easy to see that  $\Phi^{-1}((1-f)(S)) = \frac{S}{T}$  is semisimple. Therefore  $\frac{S}{T} \subseteq Soc_s\left(\frac{N}{T}\right)$ .

Recall from Türkmen & Kılıç (2022) that a module  $N$  is said (amply) cofinitely semisimple supplemented if each cofinite submodule of  $N$  has (ample) semisimple supplements in  $N$ .

**Lemma 4.** If  $N$  is a cofinitely semisimple lifting module, then it is cofinitely semisimple supplemented.

**Proof.** From the hypothesis, for a cofinite submodule  $S$  of  $N$ , we can find submodules  $T$  and  $T'$  of  $N$  where  $N = T \oplus T'$ ,  $T \leq S$  and  $T' \cap S \subseteq Soc_s(T')$ . If we take the intersection of both sides with  $S$ , then we can obtain that  $S = T \oplus (S \cap T')$  and  $N = T' + S$ . Hence  $T'$  is a semisimple supplement of  $S$  in  $N$  and so  $N$  is cofinitely semisimple supplemented.

**Theorem 5.** If  $N$  is a  $\pi$ -projective and cofinitely semisimple supplemented module, then  $N$  is cofinitely semisimple lifting.

**Proof.** Since  $N$  is cofinitely semisimple supplemented, it can be found a submodule  $T$  of  $N$  where  $N = S + T$  and  $S \cap T \subseteq Soc_s(T)$  for every cofinite submodule  $S$  of  $N$ . Moreover, there exists a submodule  $S'$  of  $N$  where  $N = S' + T$ ,  $S' \subseteq S$  and  $S' \cap T \subseteq Soc_s(S')$  because  $N$  is amply cofinitely semisimple supplemented by Proposition 3 in [Türkmen & Kılıç \(2022\)](#). Hence  $S'$  and  $T$  are mutually supplemented by 41.14(2) in [Wisbauer \(1991\)](#),  $S' \cap T = 0$  and  $N = S' \oplus T$ . As a result,  $N$  is cofinitely semisimple lifting.

**Theorem 6.** If  $N$  is a cofinitely semisimple lifting module, then each cofinite direct summand of  $N$  is cofinitely semisimple lifting.

**Proof.** Assume that  $S$  is a cofinite direct summand of  $N$  and  $L$  is a cofinite submodule of  $S$ . Then, we can find a submodule  $S'$  of  $N$  where  $N = S \oplus S'$ . By the way, we can write  $\frac{N}{L} = \frac{S}{L} \oplus \frac{S'+L}{L}$  and  $\frac{N}{S} \cong \frac{S'+L}{L} \cong S'$  where are finitely generated. Here,  $L$  is a cofinitely submodule of  $N$  because

$$\frac{\frac{N}{L}}{\frac{S'+L}{L}} \cong \frac{S}{L}. \tag{1}$$

Since  $N$  is cofinitely semisimple lifting, it can be found submodules  $T$  and  $T'$  of  $N$  such as  $N = T \oplus T'$ ,  $T \leq L$  and  $L \cap T' \subseteq Soc_s(T')$ . If we take intersection with  $S$ , then we can write that  $S = T \oplus (T' \cap S)$  and  $L \cap (S \cap T') = (L \cap S) \cap T' = L \cap T' \subseteq Soc_s(S \cap T')$ . Thus,  $S$  is cofinitely semisimple lifting.

According to [Wisbauer \(1991\)](#), if  $f(S)$  is included in  $S$  for any  $P$ -endomorphism  $f$  of  $N$ , then a submodule  $S$  of  $N$  is called *fully invariant* and if each submodule of  $N$  is fully invariant, then the module is named a *duo module* ([Özcan et al., 2006](#)).

**Theorem 7.** Let  $N$  be a cofinitely semisimple lifting module. If  $S$  is a fully invariant submodule of it, then  $\frac{N}{S}$  is cofinitely semisimple lifting.

**Proof.** Let's take  $\frac{K}{S}$  as a cofinite submodule of  $\frac{N}{S}$ . Since  $\frac{\frac{N}{S}}{\frac{K}{S}} \cong \frac{N}{K}$ ,  $K$  is a cofinite submodule of  $N$ . By using the hypothesis, we can find submodules  $T$  and  $T'$  which satisfy  $N = T \oplus T'$ ,  $T \leq K$  and  $K \cap T' \subseteq Soc_s(T')$ . Using Proposition 26 in [Kaynar et al. \(2020\)](#), we can say that  $\frac{T'+S}{S}$  is a semisimple supplement of  $\frac{K}{S}$  in  $\frac{N}{S}$ . Moreover, we have  $S = (S \cap T) \oplus (S \cap T')$  by Lemma 2.1 of [Özcan et al. \(2006\)](#). Therefore, we obtain  $\frac{N}{S} = \frac{T+S}{S} \oplus \frac{T'+S}{S}$  and  $\frac{T+S}{S} \leq \frac{K}{S}$ . Since  $K \cap T'$  is semisimple, it follows from [Kasch \(1982\)](#) that  $\frac{(K \cap T') + S}{S} = \frac{K}{S} \cap \frac{T'+S}{S}$  is semisimple. Finally,  $\frac{N}{S}$  is cofinitely semisimple lifting.

**Corollary 8.** If  $N$  is a cofinitely semisimple lifting and duo module, then each factor module of  $N$  is cofinitely semisimple lifting.

Since  $Rad(N)$  and  $Soc_s(N)$  are fully invariant submodules of  $N$ , we have the following result.

**Corollary 9.** For any cofinitely semisimple lifting module  $N$ ,  $\frac{N}{Rad(N)}$  and  $\frac{N}{Soc_s(N)}$  are cofinitely semisimple lifting.

**Theorem 10.** Let  $N$  be a module with  $Rad(N) \square N$ .  $N$  is cofinitely semisimple lifting if and only if  $N$  is cofinitely lifting and  $Rad(N) \subseteq Soc(N)$ .

**Proof.** The proof is done in Theorem 4 in [Eryılmaz \(2021\)](#).

Since projective modules have small radicals, we can get the next result.

**Corollary 11.** (1) Let  $N$  be a finitely generated module.  $N$  is semisimple lifting if and only if  $N$  is cofinitely semisimple lifting.

(2) Let  $N$  be a projective module.  $N$  is cofinitely semisimple lifting if and only if  $N$  is lifting and its radical is semisimple.

**Example 12.** The local  $\square$ -module  $\square_8$  is cofinitely lifting but not cofinitely semisimple lifting. Because  $Rad(\square_8) = \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}, \bar{6}\} \not\subseteq Soc(\square_8) = \{\bar{0}, \bar{4}\}$ .

For any  $R$ -module  $N$ , if the sum of two direct summands of  $N$  is again a direct summand of it, then  $N$  is said to have the *Summand Sum Property (SSP)*, ([Wisbauer, 1991](#)).

**Proposition 13.** If  $N$  is a cofinitely semisimple lifting module with the property (SSP) and  $S$  is a direct summand of  $N$ , then  $\frac{N}{S}$  is a cofinitely semisimple lifting module.

Proof. Assume that  $\frac{L}{S}$  is a cofinite submodule of  $\frac{N}{S}$ . Since  $\frac{\frac{N}{S}}{\frac{L}{S}} \cong \frac{N}{L}$ , it is easy to see that  $L$  is a cofinite submodule of  $N$ . By the assumption, it can be found submodules  $V$  and  $V'$  which satisfy  $N = V \oplus V'$ ,  $V \leq L$  and  $L \cap V' \subseteq Soc_s(V')$ . If we use Proposition 26 in Kaynar et al. (2020), then we can say that  $\frac{V'+S}{S}$  is a semisimple supplement of  $\frac{L}{S}$  in  $\frac{N}{S}$ . Moreover, we have  $N = (V+S) \oplus X$  for a submodule  $X$  of  $N$  because  $N$  has (SSP). Therefore, we obtain that  $\frac{N}{S} = \frac{V+S}{S} \oplus \frac{X+S}{S}$  and  $\frac{V+S}{S} \leq \frac{L}{S}$ . Moreover  $\frac{L}{S} \cap \frac{X+S}{S} \subseteq Soc_s\left(\frac{X+S}{S}\right)$ . Finally,  $\frac{N}{S}$  is cofinitely semisimple lifting.

**Lemma 14.** If  $N$  is a cofinitely lifting module with  $Rad(N) \subseteq Soc(N)$ , then  $N$  is cofinitely semisimple lifting.

**Proof.** The evidence is obvious.

Recall from Keskin (2000) that for any module  $N$ , let  $T \leq S \leq N$ . A  $T$  is named a *co-essential submodule* of  $S$  in  $N$ , if  $\frac{S}{T} \square \frac{N}{T}$ . If  $S$  has no proper co-essential submodule, then a submodule  $S$  of  $N$  is called *co-closed*. If  $T$  is a co-essential submodule of  $S$  and  $T$  is co-closed in  $N$ , then  $T$  is named as *co-closure (or s-closure)* of  $S$ .

**Proposition 15.** Let  $N$  be a module whose each cofinite submodule has a co-closure in  $N$  and  $Rad(N) \subseteq Soc(N)$ . Then  $N$  is cofinitely semisimple lifting if and only if each cofinitely co-closed submodule of  $N$  is a direct summand of  $N$ .

**Proof.** It follows from Lemma 14 and Proposition 3.6 in Wang & Wu (2010).

Since each submodule of an amply supplemented module  $N$  has a co-closure in  $N$  and each amply semisimple supplemented module is amply supplemented, we have the next result.

**Corollary 16.** Suppose that  $N$  is an amply semisimple supplemented module with  $Rad(N) \subseteq Soc(N)$ . Then,  $N$  is cofinitely semisimple lifting if and only if each cofinitely co-closed submodule of  $N$  is a direct summand of it.

**Theorem 17.** Suppose that  $\{N_j\}_{j \in J}$  is a collection of cofinite semisimple lifting modules and  $N = \bigoplus_{j \in J} N_j$ . If each submodule of  $N$  is fully invariant, then  $N$  is cofinitely semisimple lifting.

**Proof.** For any cofinite submodule  $S$  of  $N$ , we have  $S = \bigoplus_{j \in J} (S \cap N_j)$  because  $S$  is fully invariant.

Moreover, we have  $\frac{N}{S} = \bigoplus_{j \in J} \left[ \frac{(S + N_j)}{S} \right]$  and  $\frac{(S + N_j)}{S} \cong \frac{N_j}{S \cap N_j}$ . Therefore,  $S \cap N_j$  is a cofinite



submodule of  $N_j$  for each  $j \in J$ . By the assumption, since  $N_j$  is a cofinitely semisimple lifting module for each  $j \in J$ , there exist submodules  $A_j, B_j \leq N_j$  such that  $A_j \leq S \cap N_j$ ,  $S \cap B_j = (S \cap N_j) \cap B_j \subseteq Soc_s(B_j)$  and  $N_j = A_j \oplus B_j$ . It follows that  $N_j = A_j \oplus B_j \subseteq (S \cap N_j) + B_j$  and  $N_j = (S \cap N_j) + B_j$ . Let  $A = \bigoplus_{j \in J} A_j$  and  $B = \bigoplus_{j \in J} B_j$ . Since  $A_j \subseteq S \cap N_j \subseteq S$  and  $N_j = A_j + B_j$  for every  $j \in J$ , we can obtain that  $A \leq S$  and  $N = \bigoplus_{j \in J} N_j = \bigoplus_{j \in J} (A_j + B_j) = A \oplus B$ . Hence  $S \cap B \subseteq Soc_s(B)$  and so  $N$  is cofinitely semisimple lifting.

**Corollary 18.** Let  $\{N_i\}_{i \in I}$  be the collection of cofinitely semisimple lifting modules. If  $\bigoplus_{j \in J} N_j = N$  is a duo module, then  $N$  is a cofinitely semisimple lifting module.

A module with the lattice of its submodules linearly ordered under inclusion, is called a *uniserial module*. If a module can be written as a direct sum of uniserial modules, then it is called *serial*. A ring  $P$  is called *left (right) serial* if  ${}_p P$  ( $P_p$ ) is a serial module. A ring  $P$  is called *left (right) artinian*, if it satisfies the descending chain condition (dcc) on left (right) ideals. An artinian ring is a ring which is left and right artinian. A ring  $P$  is said to be *artinian serial ring* if it is both left, right artinian and left, right serial. For more detailed information on artinian and serial rings see [Wisbauer \(1991\)](#) chapters 4 and 55.

**Theorem 19.**  $P$  is a left and right artinian serial ring with  $Rad(P) \subseteq Soc({}_p P)$  iff each left  $P$ -module is cofinitely semisimple lifting.

**Proof.** By Theorem 6 in [Eryılmaz \(2021\)](#) and Lemma 14.

**Example 20.** Consider the local ring  $P = \mathbb{Z}_4$ . Note that  $Rad(\mathbb{Z}_4) = \{\bar{0}, \bar{2}\} = Soc(\mathbb{Z}_4)$  and it is left and right artinian serial ring. By using the previous theorem, each left  $P$ -module is cofinitely semisimple lifting.

Recall from [Kasch \(1982\)](#) that an epimorphism  $g : S \rightarrow N$  is named as *small cover* if  $Ker(g) \cap S$ . A projective module  $S$  together with a small cover  $g : S \rightarrow N$  is called a *projective cover* of  $N$ . If each finitely generated left (or right)  $P$ -module has a projective cover, a ring  $P$  is called *semiperfect*.

**Theorem 21.** For a ring  $P$ , the following statements are equivalent:

- (1)  ${}_p P$  is cofinitely semisimple lifting.
- (2)  ${}_p P$  is cofinitely semisimple supplemented.
- (3) Each left  $P$ -module is cofinitely semisimple supplemented.
- (4)  $P$  is semiperfect with  $Rad(P) \subseteq Soc({}_p P)$ .

**Proof.** (1)  $\Rightarrow$  (2) By Lemma 4.

(2)  $\Rightarrow$  (3) and (3)  $\Rightarrow$  (4) By Theorem 3 in [Türkmen & Kılıç \(2022\)](#).

(4)  $\Rightarrow$  (1) By Theorem 10.

### 3. Discussion and Conclusion

In this study, the concept of “cofinitely ss-lifting module” is defined based on the known concepts which can be found in the literature. Using this study, the concept of “(cofinitely)  $\delta$  – lifting module” can be defined and the similar features can be examined easily.

### References

- Eryılmaz, F. (2021). SS-lifting modules and rings. *Miskolc Mathematical Notes*, 22(2), 655-662. doi:10.18514/mmn.2021.3245
- Kasch, F. (1982). *Modules and Rings*. London, UK: Academic Press Inc.
- Kaynar, E., Turkmen, E., & Çalışıcı, H. (2020). SS-supplemented modules. *Communications Faculty of Sciences, University of Ankara, Series A1, Mathematics and Statistics*, 69(1), 473-485. doi:10.31801/cfsuasmas.585727
- Keskin, D. (2000). On lifting modules. *Communications in Algebra*, 28(7),3427-3440. doi:10.1080/00927870008827034
- Mohamed, S. H., & Müller, B. J. (1990). *Continuous and Discrete Modules*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Türkmen, B. N., & Türkmen, E. (2020).  $\delta_{ss}$  – supplemented modules and rings. *Analele științifice ale Universității "Ovidius" Constanța. Seria Matematică*, 28(3), 193-216. doi:10.2478/auom-2020-0041
- Türkmen, B. N., & Kılıç, B. (2022). On cofinitely ss-supplemented modules. *Algebra and Discrete Mathematics*, 34(1), 141-151. doi:10.12958/adm1668
- Tribak, R. (2008). On cofinitely lifting and cofinitely weak lifting modules. *Communications in Algebra*, 36(12), 4448-4460. doi:10.1080/00927870802179552
- Sözen, E. Ö. (2022). A study on Ss-semilocal modules in view of singularity. *Malaya Journal of Matematik*, 10(1), 90-97. doi:10.26637/mjm1001/008
- Özcan, A. Ç., Harmancı, A., & Smith, P. F. (2006). Duo modules. *Glasgow Mathematical Journal*, 48(3), 533-545. doi:10.1017/S0017089506003260
- Wang, Y. & Wu, D. (2010). On cofinitely lifting modules. *Algebra Colloquium*, 17(4), 659-666. doi:10.1142/S1005386710000635
- Wisbauer, R. (1991). *Foundations of Module and Ring Theory*. London, UK: Routledge. doi:10.1201/9780203755532
- Zhou, D. X., & Zhang, X. R. (2011). Small-essential submodules and morita duality. *Southeast Asian Bulletin of Mathematics*, 35(6), 1051-1062.
- Zöschinger, H. (1974). Komplementierte moduln uber dedekindringen. *Journal of Algebra*, 29, 42-56.



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Fotovoltaik Uygulamalar İçin Kararlı Tek Eksenli Bir Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Uygulaması

İsmail KAYRI

Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

İsmail KAYRI, ORCID No: 0000-0002-4973-641X

Sorumlu yazar e-posta: ismail.kayri@batman.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 26.02.2023  
Kabul: 28.03.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1256765

#### Anahtar Kelimeler

Enerji verimliliği,  
Fotovoltaik sistemler,  
Güneş enerjisi,  
Güneş izleme sistemleri,  
Tek yönlü güneş izleyici,  
Yenilenebilir enerji

**Öz:** Hücre üretim teknolojilerindeki iyileştirmelere rağmen, modüllerin enerji dönüştürme oranlarının hâlâ istenen düzeyde olmaması fotovoltaik sistemlerin en önemli olumsuzluklarından biridir. Bu amaçla bir fotovoltaik sistemden daha yüksek enerji eldesi için güneş takip sistemleri kullanılmaktadır. Literatürde bu alanda yapılmış birçok çalışma olmasına rağmen, bu çalışmaların büyük bir kısmında genellikle takip sisteminin yazılım ve devre kısmına odaklanılmakta veya oluşturulan küçük boyutlu prototipler üzerinde gerçekleştirilen kısa vadeli test sonuçlarının sunulmasıyla yetinilmektedir. Fotovoltaik sistemlerin uzun yıllar boyunca farklı atmosferik değişimlere maruz kalarak çalıştığı göz önüne alındığında, bu sistemlerle beraber kullanılan güneş takip sistemlerinin farklı hava durumları altında uzun vadeli testlere tabi tutulmaları en doğru yaklaşım olacaktır. Bu amaçla bu çalışmada, tek eksenli bir güneş takip sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Uygulamanın sürücü devresi ve mekanik aksamıyla ilgili tüm detaylar açık bir şekilde belirtilmiştir. Güneş izleyici sistem sayesinde günlük olarak elde edilen verim artışı, ilgili güne ait radyasyon ortalaması ve güneşlenme süresine göre değişmektedir. Sonuçlara göre güneş izleyici sistemin yıllık bazda %30.84 verim artışı sağladığı kaydedilmiştir.

### Design and Implementation of a Stable Single Axis Solar Tracking System for Photovoltaic Applications

#### Article Info

Received: 26.02.2023  
Accepted: 28.03.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1256765

#### Keywords

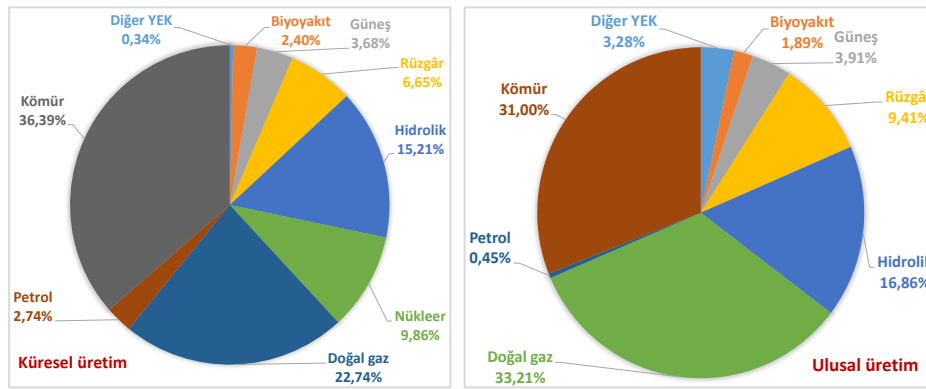
Energy efficiency,  
Photovoltaic systems,  
Renewable energy,  
Solar energy,  
Solar tracking systems,  
Single-axis solar tracker

**Abstract:** Despite the improvements in cell production technologies, the energy conversion rates of the modules are still not at the desired level and this is one of the most important disadvantages of photovoltaic systems. For this purpose, solar tracking systems are used to obtain the highest energy from a photovoltaic system. Although there are many studies in this field available in the current literature, most of these studies generally focus on the software and circuit parts of the tracking system or focus on the short-term test results carried out on the small-sized prototypes created. Considering the fact that photovoltaic systems are generally exposed to different atmospheric changes for many years, it would be the best approach to testify the solar tracking systems under long-term tests for different weather conditions. For this purpose, a single-axis solar tracking system was designed and produced in this study. All details about the driver circuit and the mechanics of the system are clearly stated. Thanks to the solar tracker system, the daily increase in efficiency varies according to the radiation average and sunshine duration of the relevant day. According to the findings, the solar tracker system increases annual yield by 30.84%.

## 1. Giriş

Küresel enerji talep miktarındaki ivmelenme gün geçtikçe artmaya devam etmektedir. Bu talebi karşılamak üzere enerji arzındaki miktar da artmak durumundadır. Ancak gerek sınırlı olarak nitelendirilebilecek fosil kökenli enerji kaynaklarındaki erişilebilir rezervlerin azalma trendine girmesi gerekse bu enerji kaynaklarının kullanılmasıyla ortaya çıkan çevresel tehditlerin çeşitli uluslararası protokoller ile denetim altına alınmaya çalışılmasının oluşturduğu baskı, ülkelerin belirlediği enerji politikalarının enerji arz ve talebi arasındaki dengenin ekolojik sürdürülebilirliğe uygun olmasını sağlamaktadır. Bu hedeflere ulaşmadaki küresel duyarlılığa rağmen, ihtiyaç duyulan enerji arzının yenilenebilir ve sürdürülebilir odaklı olması istenilen düzeyde gerçekleşmemektedir. Uluslararası Enerji Ajansı, bu kapsamda belirli periyotlarla topladığı veriler üzerinde yaptığı istatistikleri sunarak, enerji alanında bölgesel ve küresel ilerleyişlere dikkat çekmeye çalışan ve geleceğe dönük vizyonlarını paylaşan kuruluşlardan biridir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2021 sonu itibarıyla hazırladığı rapora göre, 2019 yılı içinde küresel enerji üretiminin yaklaşık %81'i fosil kökenli kömür, doğal gaz ve petrolün doğrudan veya dolaylı kullanılmasıyla gerçekleştiği kaydedilmiştir ([International Energy Agency, 2021](#)).

Sağladığı iletim, dağıtım, dönüşüm ve depolama avantajlarından dolayı elektrik enerjisi, en önemli enerji formlarından biri olarak ayrı bir konumda görülmekte ve bu enerji çeşidi alanındaki kalkınma süreci detaylı şekilde takip edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimindeki payının daha iyi anlaşılabilmesi için 2021 yılı içinde küresel elektrik enerjisi üretiminin kaynak bazında dağılımı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kaynaklara göre küresel ve ulusal elektrik enerjisi üretimi – 2021 (Ritchie & Roser, 2022).

Şekil 1'deki grafiklere göre, 2021 yılı içinde gerçekleşen küresel elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık %62'si fosil kökenli yakıtlarla sağlanmışken, Türkiye'de bu oran yaklaşık %65 olarak global ölçüğün biraz üzerinde seyretmiştir. Hidrolik enerji dâhil, yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel elektrik enerjisi arzını karşılamadaki oranı yaklaşık %28 iken, Türkiye'de bu oran yaklaşık %35 olarak kaydedilmiştir. Bu oranın global ölçüğün oldukça üzerinde olmasının sebeplerinden biri de ülkemizin sahip olduğu zengin akarsu potansiyelidir. Modern yenilenebilir enerji kaynakları olarak nitelendirilebilecek güneş, rüzgâr, biyo-yakıt, jeotermal ve dalga enerjisi kullanımıyla elektrik enerjisi üretiminin 2021 yılı içinde küresel elektrik enerjisi arzındaki payı yaklaşık %13 iken, Türkiye'de bu oran yaklaşık %18.5 değeriyle küresel oranın oldukça üzerindedir. Bu modern yaklaşımlarla 2000 yılı içindeki küresel elektrik enerjisi üretimindeki pay sadece %1.55 iken ulusal üretimdeki pay ise sifıra yakındır. Bu oranlar, modern yöntemler kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik enerjisi üretiminde küresel ölçekte 20 yıl gibi görece kısa bir sürede ciddi bir oranda artış kaydedildiğini ifade etmektedir. 2010 yılı içerisinde Türkiye'de modern yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımındaki oran %1.86 iken, bu oran 11 yıl gibi kısa bir sürede %18.5'e yükselmiştir. Bu ciddi artış, yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik kavramlarının enerji politikaları açısından doğru okunduğunu ve bu ekseninde sağlanan teşvik, hibe, finansal kredi ve çeşitli yasal düzenlemelerin ülkemiz adına umut verici olduğunu söylemek mümkündür.

Güneş enerjisiyle küresel elektrik enerjisi eldesinin 2021 yılı içindeki payı %3.68 iken ulusal üretimde bu pay aynı yıl içinde %3.91'lik oranla global değerinin biraz üzerinde kaydedilmiştir. Küresel

ölçekte bu oran 2010 yılı içinde sadece %0.15 değerinde, ulusal ölçekte ise 2015 yılı içinde bile sadece %0.07 gibi düşük orana sahiptir. Bu değerdeki iyileşmenin görece kısa sayılabilecek bir periyotta gerçekleşmesi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi güneş enerjisi ile ilgili yatırımların da doğru bir program dâhilinde yürütüldüğünü göstermektedir.

Güneş enerjisiyle elektrik enerjisi üretiminde genel olarak, ışınım enerjisini doğrudan DC formunda elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (PV) sistemler ve heliostat veya parabolik aynalar aracılığıyla güneş ışınımının belli bir noktada odaklanarak kaynama noktası yükseltilmiş tuzlu eriyiklere transfer edilen ısı enerjiden faydalanan türbin ve generatör bileşenlerini de barındıran sistemler kullanılmaktadır. Sağladığı avantajlar nedeniyle, PV sistemler aracılığıyla elektrik enerjisi üretimi, hem güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yaklaşımlar arasında hem de genel olarak tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır (Fayaz ve ark., 2022). PV sistemlerde en temel bileşenlerden biri PV modüllerdir. PV modüller genel olarak, belirli düzeylerde saflaştırılmış silisyum kristallerinden veya galyum, silisyum, indiyum, tellür, arsenit, kadmiyum, bakır, titanyum gibi elementlerin bileşikleriyle oluşturulan hücrelerin bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır (Singh ve ark., 2021). PV modüller, üretimlerinde kullanılan materyal ve teknolojiye göre mono kristal silikon, poli kristal silikon ve ince film isimlerini almaktadır. Bir PV hücrenin en önemli parametresi, güneşten gelen ışınımı elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğidir. Bu parametre, "hücre verimi" veya "enerji dönüştürme oranı" olarak ifade edilmektedir (Kayri & Gençoğlu, 2019). Hücre teknolojileri ile ilgili yapılan çalışmalarda, enerji dönüştürme oranı artırılmaya çalışılmakta ve elde edilen son başarımlar periyodik olarak araştırmacıların dikkatine sunulmaktadır. Çizelge 1'de 2021 itibarıyla ticari üretimi devam eden çeşitli PV hücreler için erişilen son hücre ve modül enerji dönüştürme oranları, açık devre gerilim değerleri ve PN jonksiyon bölgesinden geçen akım yoğunluğu değerleri sunulmuştur.

Çizelge 1. PV hücelere ilişkin hücre ve modül dönüştürme oranları (Green ve ark., 2021)

PV teknolojisi	Hücre verimi (%)	Modül verimi (%)	Hücre Voc (Volt)	Hücre Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )
Tek kristal silikon	26.7 ± %0.5	24.4 ± %0.5	0.7380	42.65
Çok kristal silikon	24.4 ± %0.3	20.4 ± %0.3	0.7132	41.47
Galyum arsenit	29.1 ± %0.6	25.1 ± %0.8	0.9940	23.20
Amorf silikon	14.0 ± %0.4	12.3 ± %0.3	1.9220	9.940
Kadmiyum tellür	21.0 ± %0.4	19.0 ± %0.9	0.8750	30.25
CIS/CIGS	23.35 ± %0.5	19.2 ± %0.5	0.7340	39.58

Hücre verimi, tek bir hücrenin yüzey alanına gelen güneş kaynaklı ışınımın elektrik enerjisine dönüştürülme oranını; modül verimi ise, bir araya gelmiş hücrelerin oluşturduğu toplam yüzey alanına gelen ışınımın elektrik enerjisine dönüştürülme oranını ifade etmektedir. Modül üzerine yerleştirilen hücreler arasındaki mesafe ve hücreler arasındaki elektriksel bağlantılarda oluşan kayıplar nedeniyle modül verimi, belli bir ölçüde hücre veriminden düşük değerdedir.

Çizelge 1 incelendiğinde, erişilen en yüksek modül veriminin %25.1 değeriyle GaAs ince film hücre teknolojisine ait olduğu görülmektedir. GaAs hücreleri, %24.4 ve %20.4 oranlarıyla sırasıyla mono kristal ve poli kristal silikon hücre teknolojileri takip etmektedir. GaAs hücreler, galyum elementinin doğadaki erişilebilir rezerv miktarı kısıtlı olduğundan, kristalize silikon hücelere göre oldukça yüksek maliyetlidirler (Li, 2012). Ancak yüksek maliyetine rağmen, yüksek sıcaklık değerlerinde bile kararlı çalışmasını sürdürebildiğinden, hem ışınım yoğunlaştırıcı mercek sistemleriyle (CPV) beraber kullanılarak verimleri daha da yükseltilebilmekte hem de çalışma koşulları gereği uzay uygulamalarında tercih edilen başlıca hücre teknolojilerindedir (Bradshaw ve ark., 2013; Schön ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2022). Ticari olarak üretilen ve PV pazarlarında hâlihazırda kullanımda olan hücre teknolojileri bir arada değerlendirildiğinde, PV teknolojisi ile elektrik enerjisi üretiminin %54'ü poli kristal ve %30'u mono kristal olmak üzere toplam %84'ü kristalize silikon teknolojisi ile sağlanmaktadır (Ogbomo ve ark., 2017; Gorjian ve ark., 2021).

PV hücre teknolojilerine ilişkin enerji dönüştürme oranlarındaki süregelen değişim, yıllara göre genellikle küçük artışlar şeklinde gerçekleşmektedir. Örneğin 2021 yılında, erişilen enerji dönüştürme oranları mono kristal silikon hücre teknolojisi için %26.7 ve poli kristal silikon hücre teknolojisi için %24.4 iken, bu oranlar 2005 yılı için sırasıyla %24.7 ve %20.3 olarak kaydedilmiştir. Bu değerlere göre, bu alanda çalışmalar yürüten birçok Ar&Ge laboratuvarına rağmen, 16 yıllık zarfta mono kristal ve



poli kristal silikon hücre teknolojisinde, enerji dönüştürme oranı değeri üzerinden sırasıyla yaklaşık %8 ve %20'lik bir iyileşme kaydedilmiştir (Green ve ark., 2005 ve 2021). Enerji dönüştürme oranındaki artışın yıllara göre seyirindeki değişim trendi, ince film teknolojisi çatısı altında bulunan diğer hücre çeşitleri için de benzer şekilde gerçekleşmiştir. Bunun yanında PV hücre verimliliğindeki artışın son 20 yıllık seyri incelendiğinde, bu artışın gittikçe daha yüksek dirençle karşılaşarak ciddi sıçramalar yaşamadığı ve yıllara göre azalan bir değişimin söz konusu olduğu görülmektedir.

Esasen, üretilmiş ve kullanıma sunulmuş bir PV modülün enerji dönüştürme oranının artırılması imkânsız değildir. Çünkü modül üreticilerinin ürünlerine ilişkin sundukları katalog verilerindeki tüm değerler, Standart Test Koşulları olarak adlandırılan, 1000 W/m<sup>2</sup> global radyasyon, 25 °C işletme sıcaklığı ve 1.5 AM (air mass: hava kütlesi) değerlerine göre elde edilmektedir. PN jonksiyon bölgesindeki hücre sıcaklığının çeşitli aktif veya pasif soğutma yöntemleri kullanılarak kontrol altına alınmasıyla PV hücrelerin enerji dönüştürme oranını artırmak mümkündür ve bu alanda çeşitli teknikler ve yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilmiş birçok araştırma mevcuttur (Bhakre ve ark., 2021; Kayri & Ayyıldız, 2021; Ramkiran ve ark., 2021; Aydın ve ark., 2022a ve 2022b).

PV sistemlerde, hücre enerji dönüştürme oranından bağımsız olarak modüllerden daha büyük enerji değerleri elde etmenin bir yolu da, PV modüllerin güneş takip sistemleri ile beraber kullanılmalarıdır. PV modüllerin yüzeyine gelen efektif ışınım miktarı, güneş geliş açısı ve modül yüzeyinin normali arasındaki açıya bağlı olarak kosinüs yasası esasına göre belirlenir. Modüllerin bu özellikleri gereğince, PV sistemlerin güneş izleyici sistemlerle beraber kullanılmasıyla, sabit açılı sistemlere göre oldukça yüksek enerji değerleri üretmeleri sağlanmaktadır. Güneş izleyici sistemlerin önemli bir başka avantajı, PV sistemlerin tesis edileceği noktadaki saha kullanım alanının sınırlı olması durumunda etkili bir çözüm sunabilmeleridir. Güneş izleyici sistemler, güneşi takip etmedeki eksen sayısına bağlı olarak, Doğu-Batı veya Güney-Kuzey olarak tek eksenli ve aynı anda hem Doğu-Batı hem de Güney-Kuzey yönünde izleme yapabilen iki eksenli izleyiciler olarak sınıflandırılmaktadır. Güneş izleyici sistemler, sağladıkları önemli faydaların yanında sistemin büyüklüğüne bağlı olarak kayda değer tesis maliyetleri ve bakım onarım giderleri oluşturabilmektedirler. İki eksenli güneş izleyicileri, barındırdıkları hareket mekanizmaları, bu mekanizmaları yöneten elektronik denetleyiciler ve çeşitli konstrüktif zorlukların doğurduğu tesis maliyetleri nedeniyle, özellikle büyük kurulu güçlere sahip PV santrallerinde genellikle tercih edilmemektedirler. Büyük kurulu güce sahip santrallerde izleyici sistemlerin tercih edilmemesinin başka bir sebebi de PV hücre fiyatlarının süreç içinde anlamlı şekilde azalmasıdır. Çünkü PV pazarının büyük çoğunluğunu kapsayan silikon esaslı hücrelerin 2010'daki birim fiyatı 2.36 USD/Watt seviyelerindeyken (Price ve ark., 2010), 2020'de 0.35 USD/Watt seviyelerine (Dehghanmadvar ve ark., 2022) kadar kayda değer bir düşüş yaşamıştır. Beklentiler, 2030'dan önce bu hücre fiyatlarının 0.18 USD/Watt seviyelerine kadar düşeceği yönündedir (Oberbeck ve ark., 2020). Güneş izleyici sistemler, küçük ve orta ölçekteki PV sistem uygulamalarında hâlâ yoğun şekilde kullanılmaktadır. Özellikle uygulama sahasında alanın sınırlı olması hâlinde PV sistem boyutunu değiştirmeden daha yüksek enerji miktarları elde etmek üzere tesis edilmiş küçük ve orta ölçekli sayısız PV güneş izleme sistemi mevcuttur.

Bir güneş izleyici sistemden genel olarak, doğruluk, kararlılık, süreklilik gibi özellikler beklenir. Bunların yanında, geri dönüş sürelerinin kabul edilebilir düzeyde olabilmesi için, tesis ve bakım-onarım maliyetlerinin düşük olması gerekmektedir. Güneş izleyici sistemler, bu amaçlara hizmet edecek şekilde, açık döngü yaklaşımların kullanıldığı mikrodenetleyici devrelerle gerçekleştirilebildiği gibi, ışık yoğunluğundan etkilenen devre elemanlarının kullanılmasıyla oluşturulan ve genel olarak sensörlü sistemler olarak adlandırılan kapalı döngü yaklaşımlarla da gerçekleştirilebilmektedir. Her iki yaklaşımda da, izleyici sistemin öz tüketim değerlerinin minimize ve PV sistem çıkış gücünün maksimize edilebilmesini amaçlayan yapay sinir ağları veya bulanık mantık tekniklerini kullanan optimizasyon algoritmaları kullanılabilir. Literatürde bu esaslar üzerine geliştirilmiş birçok güneş izleyici sistem tanıtılmaktadır. Ancak bu çalışmaların önemli bir kısmı (Visconti ve ark., 2015; Motahhir ve ark., 2019; Pawar ve ark., 2021), geliştirilen güneş izleyici sistemleri kontrol eden yazılımlar ve elektronik devreler üzerinde yoğunlaşırken, yine önemli bir kısmı (Proadhan ve ark., 2016; Du ve ark., 2021; Barbón ve ark., 2021; Xu ve ark., 2022), izleyici sistemlerin mekanik aksamı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunlarla beraber, birçok araştırma "düşük maliyetli" güneş izleme sistemi çalışmalarını kapsayan önerilerden oluşmaktadır. Bu çalışmaların önemli bir kısmında (Gabe ve ark., 2017; Hammoumi ve ark., 2018; Putra ve ark., 2019; Jaafar ve Maarof, 2022), önerilen sistemlere ilişkin deneysel uygulamalar ya küçük boyutlu prototipler şeklinde gerçekleştirilmekte ya da önerilen sisteme



ait uygulama orta veya büyük boyutlu olmasına rağmen, orta ve uzun vadeli testlere tabi tutulmadığı, sadece kısa vadeli test sonuçlarının sunulmasıyla yetinildiği görülmektedir. Zaghba ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada, yaz mevsiminde tek eksen izleyici sistemin sabit açılı sisteme göre günlük bazda %16 ila %23 arasında enerji kazancı sağlandığı belirtilmiştir. Kuttybay ve ark. (2020) temmuz ayı içinde yaptıkları 5 günlük çalışmanın sonuçlarına göre, önerilen tek eksen izleyici sistemin sabit açılı sisteme göre günlük bazda %37 ila %60 arasında, 5 günün kümülatif değerlerine göre ise %57 oranında verim artışı elde edildiği kaydedilmiştir.

Fotovoltaik sistemlerin uzun yıllar boyunca farklı atmosferik değişimlere maruz kalarak çalıştığı göz önüne alındığında, bu sistemlerle beraber kullanılan güneş takip sistemlerinin farklı hava durumları altında uzun vadeli testlere tabi tutulmaları en doğru yaklaşım olacaktır. Bu sayede, gerek mekanik sistemin çalışma ortamındaki fiziksel şartlara cevabı, gerekse mekanik sistemi yönetmek için kullanılan sensör ve denetleyicilerin farklı hava şartlarındaki davranışları değerlendirilerek, güneş izleyici sistemlerden beklenen doğruluk, kararlılık ve süreklilik fonksiyonları etkin bir şekilde ortaya konulmuş olacaktır.

Bu çalışmada, bu amaçla tek eksenli bir güneş takip sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Güneş izleyici sistemin tasarımı esnasında karşılaşılan sorunlar ve geliştirilen çözümler ortaya konulmak üzere, uygulamanın sürücü devresi, sensör yapısı ve mekanik aksamıyla ilgili tüm detaylar açık bir şekilde belirtilmiştir. Önerilen güneş izleyici sistemin birçok farklı hava durumundaki enerji üretimi, sabit bir modül ile kıyaslanmış ve sonuçlar tablolar ve grafikler hâlinde sunularak tartışılmıştır. Uzun vadeli test sonuçlarına göre, gerçekleştirilen uygulamanın, doğruluk, kararlılık ve süreklilik özelliklerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bununla beraber, tesis maliyetinin ve geri dönüş süresinin sistemin boyutuna ve kullanılacağı bölgenin meteorolojik rejimine göre değişebileceği öngörülmektedir. Önerilen güneş izleyici sistemin, araştırmacılarca yürütülen PV modüllerle ilgili deneysel çalışmalarda veya profesyonel amaçlı küçük ve orta kurulu güçlere sahip PV uygulamalarda etkili bir çözüm sunacağı düşünülmektedir.

## 2. Materyal ve Yöntem

PV sistemlerle ilgili yapılan deneysel çalışmalarda, deney ortamının yapıldığı ortamın harici kaynaklar tarafından gölgelenmemesi önemli bir husustur. Özellikle karşılaştırmalı deneylerde, karşılaştırılan modüllerin ürettikleri enerji değerleri arasında yakın veya uzak nesnelere kaynaklı kısmi veya tam gölgelenme durumları modüller üzerinde eşit seviyede oluşamayacağından, hatalı sonuçların elde edilmesi ihtimali yüksektir. Bu hususlar göz önüne alındığında, tek eksen güneş izleyici sistemle çalıştırılan PV modül, sabit açılı hareketsiz PV modül ve bu modüllerin ürettiği enerjiyi ve çeşitli atmosferik parametreleri ölçmeye yarayan sensörlerin ölçüm sonuçlarını kaydetmek üzere kullanılan data loggerı da içeren meteoroloji istasyonu, uzun vadede birbirini gölgelemeyecek pozisyonlarda yerleştirilmişlerdir.

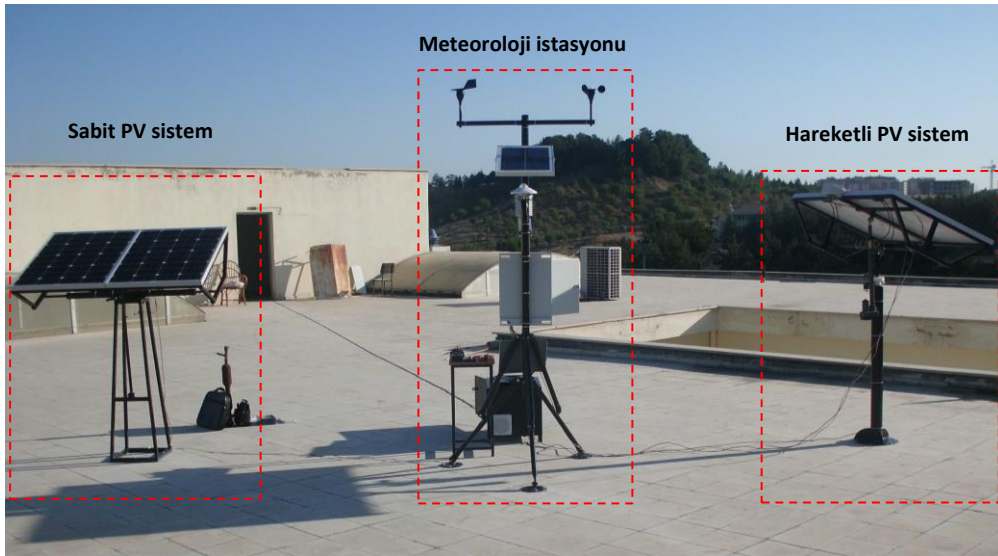


Şekil 2. Deneysel çalışmanın yapıldığı konumun uydu görüntüsü.

Deneyel çalışma, 37°54"12.11' Kuzey ve 41°07"46.71' Doğu koordinatlarında, Batman Üniversitesi merkez yerleşkesinde görece yüksek bir binanın çatı katında gerçekleştirilmiştir. Deney setinin uydu görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Deney setinin konumu ile uzak gölgeleme unsuru olarak değerlendirilebilecek Doğu yönünde bulunan yapı arasında, 85 metre gibi yüksek bir mesafe ve 3 metre değerindeki düşük kot farkı dolayısıyla, seçilen konumun uzak gölgeleme unsurları açısından da çok iyi olduğu söylenebilir.

## 2.1. Deney setinin tanıtımı

Deney seti genel olarak 3 bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, doğu-batı ekseninde hareket edebilen polar eksenli bir güneş izleyici sistemle çalışan hareketli PV modül, sabit açılı PV modül ve meteoroloji istasyonudur. Meteoroloji istasyonunda, global radyasyon değerini ölçmek üzere CMP6 piranometresi, hava sıcaklığını ve bağıl nem oranını ölçmek üzere HC2S3 probu, rüzgâr hızını ölçmek üzere 40C sensörü, rüzgâr yönünü ölçmek üzere 200P sensörü ve bu sensörlerden gelen verileri ve hareketli ve sabit PV modülün ürettiği güç değerlerini ölçmek ve kaydetmek üzere kullanılan CR1000 data loggerı bulunmaktadır. Bu tür çalışmalarda hassas sonuçların elde edilebilmesi için, meteoroloji istasyonunun ve güneş izleyici sistemin ihtiyaç duyduğu enerjinin, deneyel testler için kullanılan PV modüller tarafından karşılanmasından kaçınılmalıdır. Bu amaçla meteoroloji istasyonunun ihtiyaç duyduğu enerji, harici bir PV modülünün şarj regülatörü aracılığıyla şarj ettiği 10 AH kapasiteli bir akü tarafından; güneş izleyici sistemin zayıf ve kuvvetli akım ihtiyacı ise sistemin elektrik kesintileri durumunda da çalışmasını sürdürebilmesi için kesintisiz bir güç kaynağı üzerinden sağlanmıştır. Şekil 3'te deneyel çalışmanın temel bileşenleri olan sabit açılı PV modül, hareketli PV modül ve meteoroloji istasyonu gösterilmiştir.

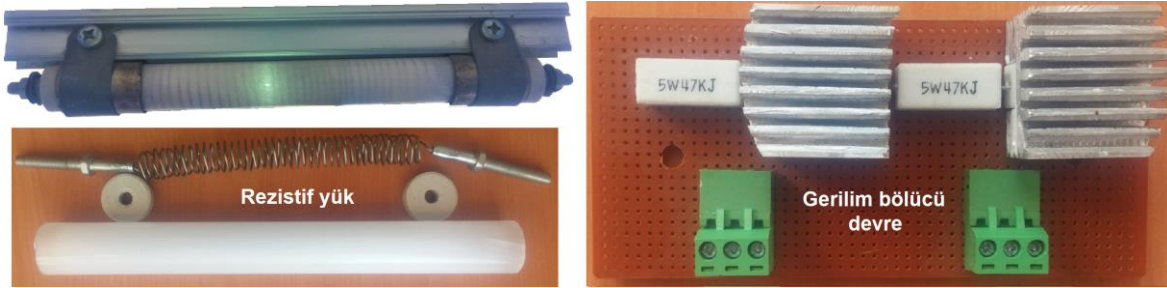


Şekil 3. Deneyel çalışmanın genel görüntüsü.

Deneyel çalışmada, kullanılan tüm sensörlerden elde edilen veriler kaydedilmişse de, güneş izleyici sistemle beraber çalışan PV modülün sabit açılı modüle göre üretilen enerji değerleri bakımından karşılaştırılabilmesi için, çalışma kapsamında sadece modüllerin ürettikleri güç değerleri ve piranometre tarafından ölçülen global radyasyon değeri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Batman ilinde gündeğümü azimut açısı ( $\gamma_s$ ), minimum değerini 21 aralık tarihinde 71.49° olarak, maksimum değerini ise 21 haziran tarihinde 110.95° olarak almaktadır. Güneş yükseklik açısı ( $\alpha_s$ ) ise, minimum değerini 21 aralık tarihinde 28.58° olarak, maksimum değerini ise 21 haziran tarihinde 75.07° olarak almaktadır. Batman ilinde güneşin 1 yıllık hareket rotası, bu sınırlar arasında değerler olarak gerçekleşmektedir. Tasarlanan izleyici sistemin güneşten gelen ışığın bütün açı değerlerine karşı tepkisinin değerlendirilebilmesi için testler 365 gün için yapılmıştır.

PV modüllerin ürettikleri enerjilerin ölçülmesine dair belirli bazı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlardan biri, farklı şartlar altında işletilen modüllerin karşılaştırılmasına yönelik çalışmalarda

kullanılabilen açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımlarının ( $I_{sc}$ ) ölçülmesini içermektedir. Bu yaklaşımda elde edilen veriler, modüllerin ürettiği güç değerlerini yansıtmamakla beraber göreceli verim değişimi hakkında önemli bir bilgi sunmaktadır. Bir diğer yaklaşım, modüllerin ürettikleri enerjilerin mikro inverterler ile şebekeye basılması ve şebekeye aktarılan enerji değerlerinin karşılaştırılması şeklindedir. Bu yöntemde, modüllerin düşük ışınım altında ürettikleri gerilim değerlerinin, mikro inverterlerin çalışma gerilimi aralığının alt sınırından daha düşük olması hâlinde, üretilen enerjinin şebekeye basılamaması sorunu mevcuttur. Dolayısıyla bu yaklaşım, çok sayıda modülün seri bağlanmasıyla oluşturulan PV dizilerince üretilen enerjilerin karşılaştırılmasında tercih edilmektedir. PV modüllerin ürettiği enerjilerin karşılaştırılmasında kullanılan bir yaklaşım da, modüllerin elektriksel bir yükle yüklenmesi şeklindedir. Bu yöntemde bir maksimum güç noktası izleyici (MPPT) devresi bulunmadığından, modüllerin ürettiği enerji değeri net olarak yansıtılamayacak olsa da, karşılaştırmalı çalışmaların kapsamı gereğince tercih edilebilecek yöntemlerden biridir. Bu çalışmada modüllerin enerjilerinin ölçülebilmesi için maksimum ışınım altında 90 Wp güç üretebilen modüllerden bu gücün tümünü talep edebilecek direnç değerine sahip iki adet rezistif yük tasarlanmıştır. Bu yüklerin üzerindeki gerilim değerleri, modüllerin optimum işletme gerilimi ( $V_{mp}$ ) gereğince 0 ila 18.2 Volt arasında değişecektir. Buna karşın kullanılan CR1000 data loggeri 0 ila 5 Volt arasındaki gerilimleri ölçebildiğinden, modüller ile data logger arasında bir gerilim bölücü devre tasarlanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan gerçek gerilim değerleri ise gerilim bölücü devrenin dönüştürme katsayısı kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4'te tasarlanan rezistif yükler ve gerilim bölücü devre sunulmuştur.



Şekil 4. Tasarlanan rezistif yük ve gerilim bölücü devre.

Rezistif yüklerin tasarımında, direnç değerinin uzun vadede değişime uğramaması için, korozyona karşı dayanıklı krom nikel (CN80) alaşım tel kullanılmıştır. Gerilim bölücü devrenin tasarımında, ısıya dayanıklı yüksek güçlü seramik dirençler kullanılmasına rağmen, oluşan ısının kolayca transfer edilebilmesi amacıyla dirençlerle azami yüzey teması sağlayacak biçimde alüminyum pasif soğutucular kullanılmıştır. Direnç yüzeyi ile pasif soğutucular arasındaki ısı transferini iyileştirmek üzere termal macun kullanılmıştır.

## 2.2. Mekanik tasarım

Güneş izleyici sistemin mekanik aksamı gerçekleştirilmeden önce, sistemi oluşturan bileşenler önce SolidWorks katı modelleme ve tasarım yazılımı ile 3 boyutlu olarak modellenmiş ve aynı yazılımın montaj modülü kullanılarak bileşenlerin uyum içinde çalıştığı doğrulanmıştır. İzleyici sistemin tüm bileşenleri, çeşitli boyutlarda civata birleştirme elemanlarının kullanılmasıyla bir araya getirilebilecek biçimde modüler olarak üretilmiştir. Üretimde genel olarak çeşitli et kalınlığı ve boyutlarda boru, kare profil, dikdörtgen profil, lama ve L profil çelik malzemeler kullanılmıştır. PV modülleri ve modül taşıyıcıların ağırlığını taşıyan flanşlı yapının mili, ana platform içinde iki adet rulman ile yataklanmıştır. Bu sayede izleyici sistemin hareketi için küçük enerji miktarlarının yeterli olması sağlanmıştır. Hareketli mekanizma herhangi bir sınırlama ile karşılaşmadığı takdirde kendi etrafında 360° dönebilmektedir. Tipik bir güneş izleyici sistemden beklenen davranış ise, sistemin tesis edildiği bölgede güneşin bir yıl içinde izlediği rota değişimi ile uyum içinde hareket etmesidir. Bu amaçla mekanik aksamın hareketi, Batman iline ait gündoğumu azimut açısının maksimum değeri olan 110.95° değeri göz önünde bulundurularak, elektronik denetleyiciye gerekli bilgiyi göndermek için kullanılan doğu ve batı olmak üzere iki adet limit anahtarları ile sınırlandırılmıştır. Bu izleyici sistemin Batman ilinden farklı enlem açısına ( $\theta$ ) sahip bölgelerde kullanılması durumunda, sınır anahtarlarının, ilgili bölgenin maksimum

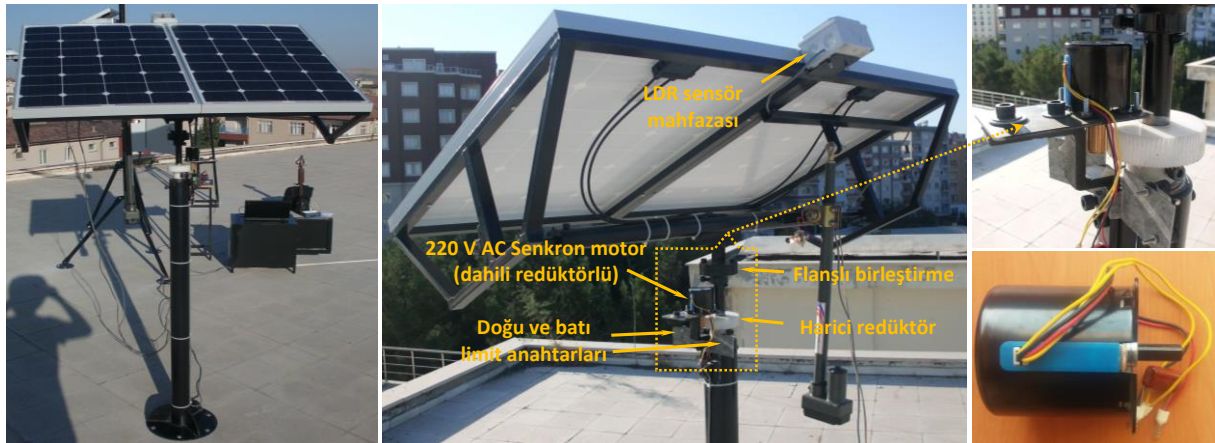


günoğumu azimut açısı değerine göre konumlandırılması gerekmektedir. Güneş izleyici sistemin 3D katı modellemesinde kullanılan tüm bileşenler ölçeksiz olarak, bu bileşenlerle oluşturulan montaj görüntüsü ise ölçekli olarak Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Güneş izleyici sistemin 3D katı modeli.

Doğu-batı yönünde hareket eden güneş izleyici sisteme ilişkin üretilen sistem bileşenlerinin bir araya getirilerek tamamlanmış nihai görüntüleri Şekil 6'da çeşitli açılardan sunulmuştur. Tasarlanan sistemde, güney kuzey yönünde izleme yapmak üzere lineer aktüatör alt yapısı hazırlanmışsa da, çalışma kapsamında bu özellik kullanılmamıştır. Sistemin iki eksenli güneş izleyici olarak kullanılmak istenmesi durumunda, doğu-batı ve kuzey-güney yönünde izleme yapmak için bağımsız çalışan iki adet elektronik denetleme devresine ihtiyaç duyulacaktır. Bununla beraber, kuzey-güney yönündeki hareket için LDR sensör yapısı ve sınır anahtarları da bağımsız olarak tasarlanmalıdır.



Şekil 6. Güneş izleyici sistem bileşenleri ve montaj görüntüsü.

Güneş izleyici sistemin hareketi, 220 Volt, 14 Watt, 5 devir/dakika değerlerindeki bir senkron motor ile sağlanmıştır. Bu motorun milinde, düşük gücüne rağmen içinde bulunan dahili redüktör sayesinde 3.92 Nm tork üretilmektedir. Yapılan ön testlerde, motor gücünün sistem için yeterli olduğu,

ancak 5 devir/dakika değerindeki motor hızının sistemi istenilen hassasiyet aralıklarında hareket ettirmediği gözlemlenmiştir. Hem izleme hassasiyetinin iyileştirilmesi, hem de döndürme momentinin daha da artırılması için haricî bir redüktör sistemi tasarlanmıştır. Bu amaçla, motor çıkış mili ile hareket sistemi mili arasına yerleştirilen 12/62 oranında haricî bir redüktör sistemi üretilmiştir. Haricî redüktör sistemindeki küçük dişli pirinç, büyük dişli ise yüksek mukavemet ve düşük sürtünme katsayısı ile öne çıkan Delrin® (polioksümetilen) malzemeden üretilmiştir. Bu redüktör sayesinde motor hızı yaklaşık 5 kat azaltılarak, hareket sisteminin istenilen hassasiyete ulaştığı gözlemlenmiştir.

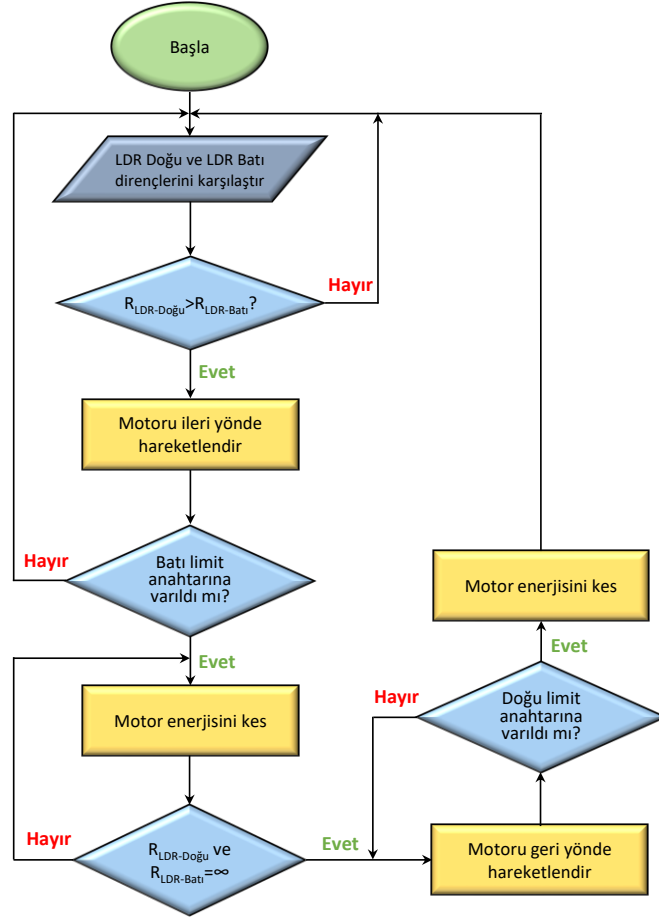
Tasarlanan güneş izleyici sistemde, güneşin anlık konumu takip edilmek üzere iki adet LDR komponenti kullanılmıştır. Işık miktarına bağlı olarak direnci değişen LDR'lerin bu özelliği temel alınarak kurgulanan elektronik denetleyici tarafından sürülen senkron motor sayesinde izleyici sisteme monte şeklindeki PV modüller gün boyunca güneşi izleyebilmektedir. Hassas bir izlemenin gerçekleşmesi için Şekil 6'da bulunan LDR sensör mahfazasının PV modüllerin doğu-batı doğrultusuna paralel tespit edilmesi gerekmektedir. "LDR doğu" ve "LDR batı" olarak adlandırılan devre elemanlarının özdeş olmasına dikkat edilmelidir. Özdeşlikleri, eşit şartlar altında gösterecekleri direnç değerlerinin birbirine çok yakın olmalarıyla test edilebilir. Bu elemanların montaj işleminde, mahfaza opak bir malzeme ile dikey olarak ikiye ayrıldıktan sonra, elemanların üst yüzeyi aynı düzlemde olacak şekilde ara elemana dayanmasına dikkat edilmelidir. Kullanılan sensör mahfazası açık hava şartlarında uzun vadede işletmede kalacağından dolayı, su ve toz geçirimine karşı dirençli (IEC 60529 – en az IP65) standartlarda olmasına dikkat edilmelidir. Güneş ışığının mahfaza içine homojen ve yansıma yapmayacak şekilde alınabilmesi için ön yüzeyde kullanılan camın düşük demir oranlı ve yansımayı engelleyen buzlu yapıdaki temperlenmiş özellikte olmasına dikkat edilmelidir. Bireysel kullanımlarda bu özelliklerde cam temin etmede sorunlar yaşanabilmektedir. Bu durumda, mahfazanın "LDR doğu" bölmesinde plastik iç cidarın mat bir boya ile kaplanması, ışık yansımalarını engelleyerek sistemin daha kararlı çalışmasını sağlayabilmektedir. Güneş izleyici sistemin hareket aralığını sınırlandırmak üzere kullanılan limit anahtarları, sistemin kullanılacağı bölgenin yıllık güneş açıları değerleriyle uyumlu olacak şekilde, açıları ayarlanabilen metal levhalar üzerine monte edilmişlerdir. LDR sensörlerinin mahfaza içindeki ve limit anahtarlarının metal levhalar üzerindeki yerleşimine ait görüntü Şekil 7'de sunulmuştur.



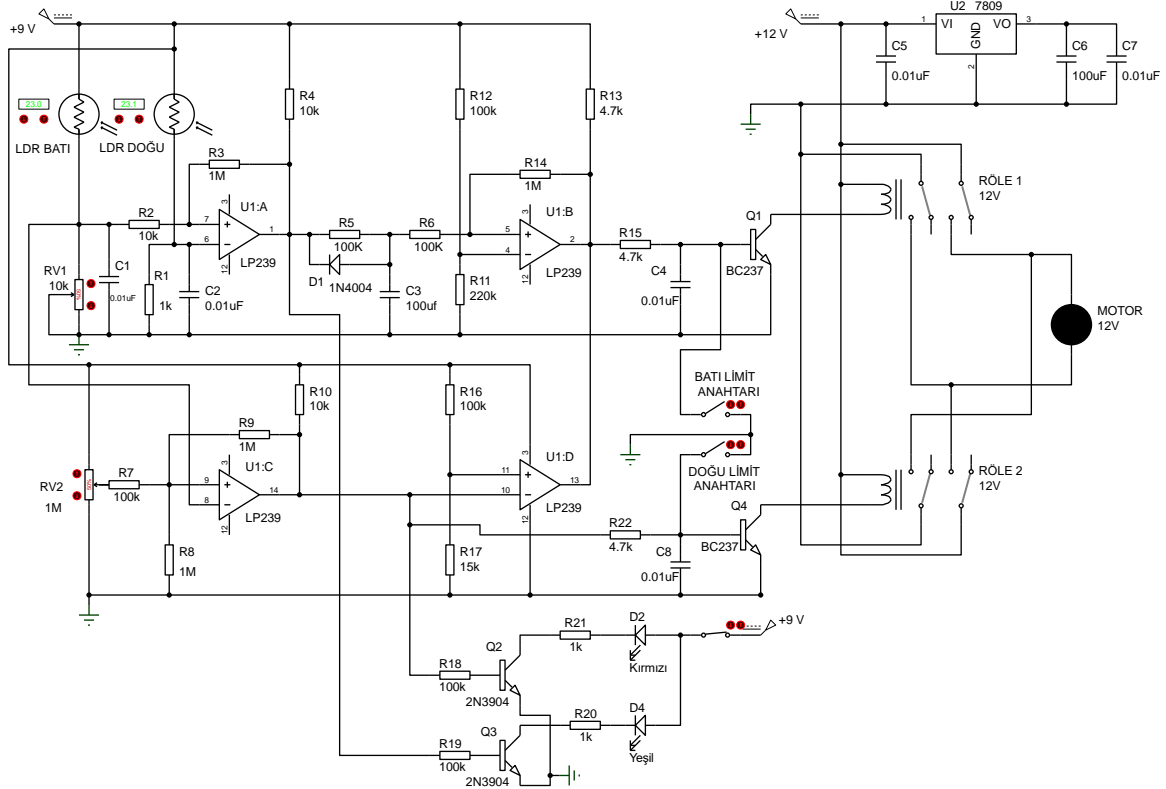
Şekil 7. LDR sensörlerinin ve sınır anahtarlarının yerleşim düzeni.

### 2.3. Denetleyici devrenin tasarımı

Güneş izleyici sistemin mekanik aksamını hareket ettiren elektrik motorunu işleyişe uygun şekilde kontrol etmek üzere elektronik bir denetleme devresi tasarlanmış ve üretilmiştir. Denetleyicinin tasarımı işlemsel yükselteçlerin karşılaştırıcı olarak kullanılması ilkesine dayanmaktadır. Çalışmada kullanılan elektronik denetleyici için, Gupta ve ark. (2012) tarafından önerilen Opamp karşılaştırma devresi temel alınmış olup devre üzerinde iyileştirmeler sağlanmıştır. Geliştirilen denetleyici devrenin üretimine geçilmeden önce, kararlılık testlerini gerçekleştirmek üzere Proteus 7.4 ISIS yazılımı ile simüle edilmiştir. Denetleyicinin çalışma algoritmasına ilişkin akış diyagramı Şekil 8'de, ISIS'te çizilen simülasyon devresi Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 8. Elektronik denetleyici algoritması akış diyagramı.

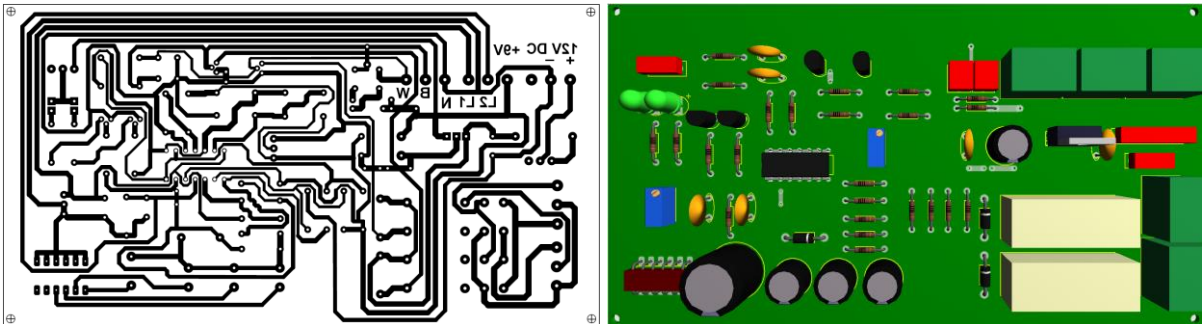


Şekil 9. Elektronik denetleyici devresi ISIS simülasyonu.



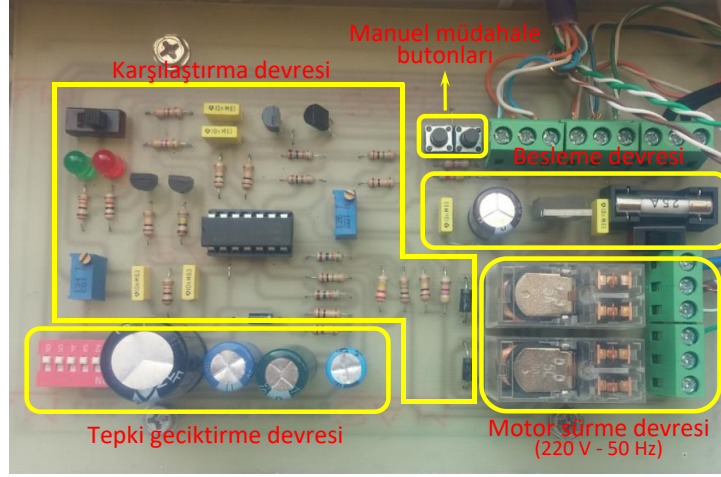
Simülasyon devresinde bulunan devre elemanlarının değerleri, denetleyicinin kararlı bir çalışma sunmasını sağlayacak şekilde tespit edilmiştir. Bu devrede U1:A opampı "LDR doğu" ve "LDR batı" sensörleri üzerindeki gerilimleri karşılaştırılmaktadır. Güneş batıya doğru hareket ederken LDR mahfazası içindeki ayırıcı aparat, "LDR doğu" sensörü üzerinde gölge oluşturarak direnç değerinin artmasına neden olacaktır. "LDR doğu" sensörü yüksek direnç değeri gösterdiğinde, R1 direnci üzerindeki gerilim RV1 potansiyometresi üzerine düşen gerilimden daha düşük değer olarak U1:A opampının pozitif çıkış gerilimi vermesini sağlayacaktır. Bu çıkış gerilimi C3 kondansatörünü şarj etmeye başlayacaktır. U1:B opampı C3 ile R21 elemanı üzerindeki gerilimi karşılaştırmaktadır. C3 kondansatörünün gerilim değeri R21 direncinin gerilim değerinden daha büyük olduğunda U1:B pozitif gerilim çıkışı vererek Q1 transistörünü ilettime götürmektedir. Q1 transistörü Röle 1'e enerji vererek motorun sistemi batı yönünde hareket ettirmesini sağlamaktadır. Motorun hareketi, mekanik sistemle beraber hareket eden LDR sensörlerinin eşit miktarda ışık almasıyla son bulmaktadır. Sistem bu şekilde gün boyunca hareket eden güneşi takip etmektedir. Hareketli mekanizmanın batı yönüne varmasıyla aktif olan "batı limit anahtarı" Q1 transistörünü kesime götürerek motorun enerjisini kesmektedir. U1:C opampı RV1 ile RV2 potansiyometreleri üzerindeki gerilimleri karşılaştırmaktadır. Ortam yeteri düzeyde karanlık olduğunda "LDR batı" sensörü büyük direnç değeri olarak RV2 geriliminin RV1 geriliminden büyük olmasını ve böylece U1:C opampının pozitif çıkış vermesini sağlamaktadır. U1:C opampının pozitif çıkış değeri Q4 transistörünü ilettime götürmektedir. Q4 transistörü Röle 2'ye enerji vererek motorun sistemi doğu yönünde hareket ettirmesini sağlamaktadır. Hareketli mekanizmanın doğu yönüne varmasıyla aktif olan "doğu limit anahtarı" Q4 transistörünü kesime götürerek motorun enerjisini kesmektedir. Sistem bu sayede sonraki gün çalışmak üzere doğru pozisyona gelmektedir. Kararlı bir çalışma için hareketli sistemin devreye ilk alınması sırasında LDR sensörlerinin kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için RV1 ve RV2 ayarlı dirençleri kullanılmıştır. RV1 direnci, LDR sensörlerinin gösterdiği direnç değerleri arasındaki farkın boyutuna bağlı olarak motoru süren rölenin devreye girme sıklığını tayin ederken, RV2 direnci, hareketli sistemin doğu limit anahtarına kadar getirilmesi işleminin hangi aydınlık düzeyinde gerçekleşeceğini belirlemek için kullanılmaktadır. Q2 ve Q3 transistörleri, kalibrasyon işlemi yapılırken, sistemin doğu ve batı yönündeki hareketini göstermek üzere sinyalizasyon amaçlı kullanılan D2 ve D4 diyotlarını sürmek için kullanılmıştır. Sistemin tesis edildiği yerde, havanın parçalı bulutlu olduğu zaman dilimlerinde, bulutların LDR sensörleri üzerinde oluşturacağı geçici ani gölgelendirmeler hâlinde sistemin hareket etmesi istenmez. Bu durumlarda sistemin tepkisini geciktirmek üzere bir RC devresi kullanılmıştır. Bu görevi yerine getirmek için R5 ve C3 elemanları kullanılmıştır. Sistem tepki süresinin ayarlanabilir bir yapıda olabilmesi için seçici anahtar ile bağımsız olarak devreye alınabilen dört adet kondansatör kullanılmıştır.

Simülasyon aşamasında kararlı hâle getirilen denetleyici devrenin baskı şemasının tasarımında Proteus (7.4) ARES yazılımı kullanılmıştır. Elemanların bakır plaket üzerindeki yerleşim düzeni, denetleyici devrenin fonksiyonlarına göre ayrı bölgelemlerde olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Baskılı devre şeması ve elemanların yerleşim düzeni Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Baskılı devre şeması ve elemanların yerleşim düzeni.

Üretilen denetleyici devrenin son görüntüsü ise Şekil 11'de sunulmuştur. Şekilde görülen elektronik kart, bu devrede bulunan ince bakır yolların uzun vadede korozyona uğramaması için kapalı bir mahfaza içine alınmıştır. Bu mahfazanın açık hava şartlarında işletilmesi durumunda su sızmasına karşı dirençli bir yapıya sahip olması gerekmektedir.



Şekil 11. Denetleyici devrenin tamamlanmış montaj görüntüsü.

Simülasyonda 12 Volt DC motor kullanılmışsa da, gerçekleştirilen devrede denetleyici beslemesinden bağımsız şekilde 220 Volt AC gerilim kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, ihtiyaç duyulan bu enerji kesintisiz bir güç kaynağından karşılanmıştır. Bu sayede güneş izleyici sistemin, şehirde yaşanan elektrik kesintileri durumunda da çalışabilmesi sağlanmıştır.

Hareketli PV sisteminin ilk kurulumunda PV modüllerin tamamen güneşe yönlendirilmesi işleminin yapılması gerekmektedir. Bu işlemin yapılması, modül düzlemlerinin belli bir ölçüde güneşe yönlendirilmiş olmasını gerektirir. Bu durumda denetleyici kart üzerinde bulunan ve motoru ileri ve geri yönde çalıştıran transistörleri doğrudan sürebilecek şekilde tasarlanmış manuel müdahale butonlarından faydalanılmalıdır.

Yapılan çalışmada senkron veya asenkron motor kullanılması durumunda motorun ileri ve geri yönde hareketinin sağlanmasında motor sürme devresindeki röle bağlantıları doğru kurgulanmalıdır. DC motorların devir yönünün değiştirilmesi için gerilim polarizasyonunun değiştirilmesi yeterliyken AC senkron motorların devir yönünün değiştirilmesi işleminde üretici tarafından sağlanan bağlantı şeması dikkate alınmalıdır.

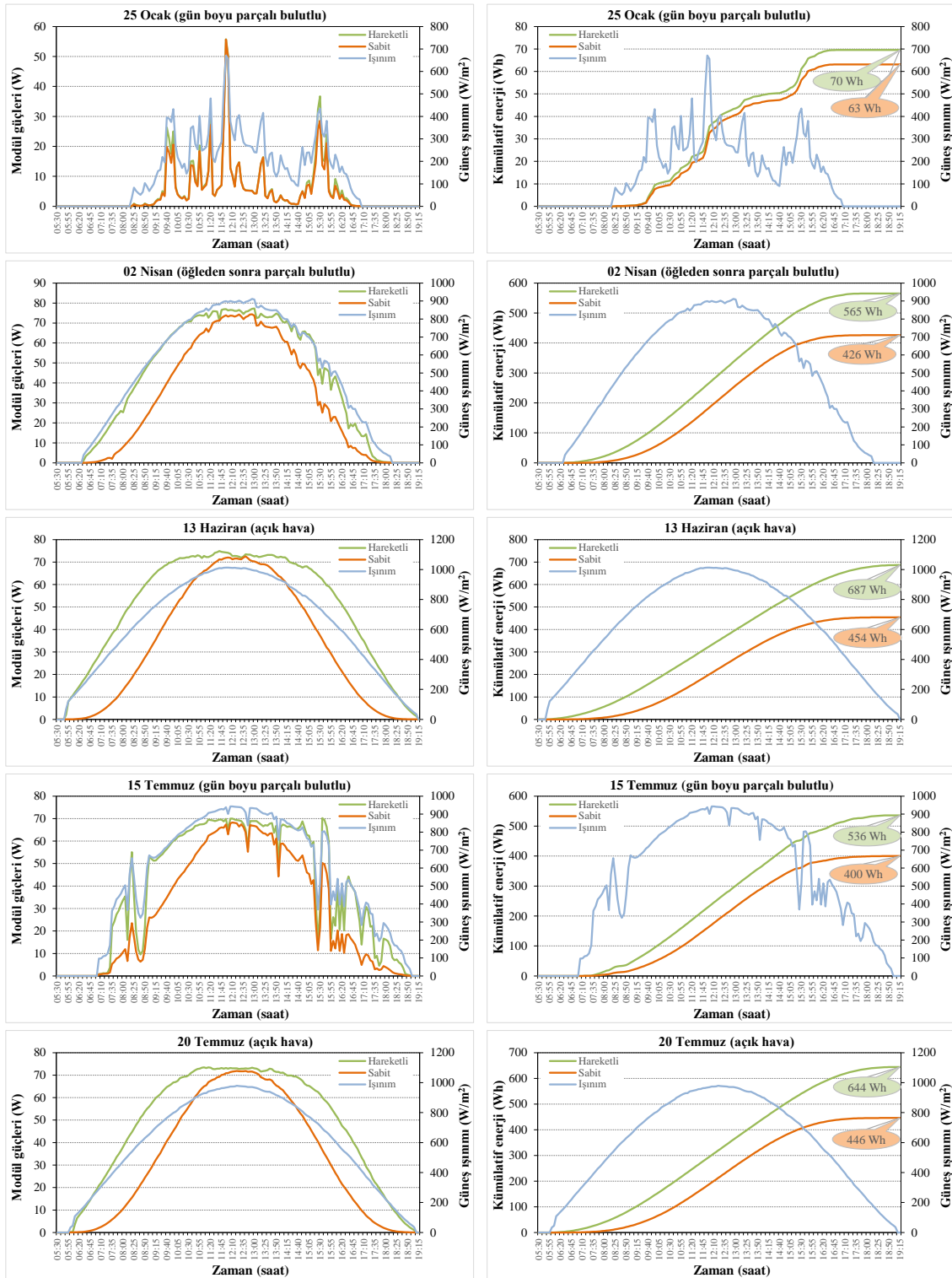
### 3. Bulgular ve Tartışma

PV sistemlerin, uzun yıllar boyunca açık hava şartlarında işletmede kalabilen yapıları gereği, hem konstrüktif hem de elektriksel kontrol yapıları açısından yeterli ekonomik ömre sahip olmaları gerekmektedir. Bununla beraber özellikle hareketli PV sistemlerinde, sağladığı görece büyük enerji miktarları dolayısıyla tercih edilen güneş izleme sistemlerinin doğurduğu ek maliyetler düşünüldüğünde, geri dönüş süresi de planlanması gereken parametreler arasındadır. Güneş izleyici sistemlerin kullanıldığı PV sistemlerde geri dönüş süresinin kabul edilebilir düzeyde olmasının sağlanabilmesi için, güneş izleme özelliğinin kararlı çalışması son derece önemlidir. Bir PV sistemin kararlılığı doğruluk, hassasiyet ve süreklilik olarak özetlenebilecek fonksiyonların test edilmesiyle mümkün olabilir. Bu fonksiyonlardan doğruluk ve hassasiyet kısa vadeli, süreklilik fonksiyonu ise ancak uzun vadeli testler sonucunda değerlendirilebilmektedir.

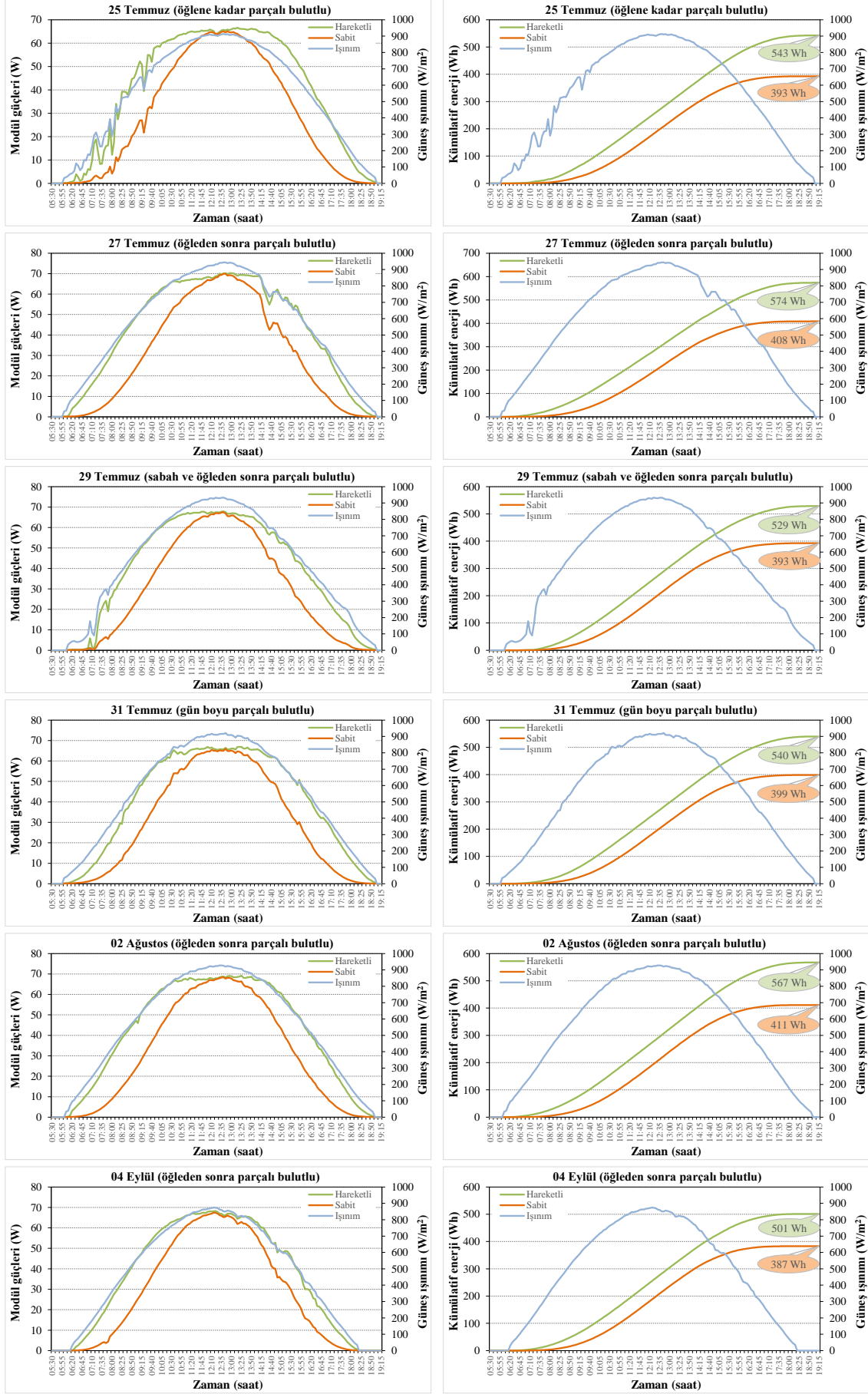
#### 3.1. Bulgular

Deneyisel çalışma tüm bileşenleriyle, konumu ve çevresel özellikleri daha önce belirtilen lokasyonda zemine tespit edilerek tesis edilmiştir. Öncelikle havanın açık olduğu bir günde doğruluk ve hassasiyet testleri gerçekleştirilmiştir. RV1 ayarlı direnci aracılığıyla, PV modül düzlemlerinin güneşe yönlendirilmesi sağlanabilmiştir. Gün boyunca yapılan gözlemler sonucunda, modüllerin güneşi yüksek bir doğruluk ve hassasiyetle izlediği ve günün sonunda sınır anahtarına temas sağlandığında sistemin bekleme moduna geçtiği görülmüştür. Güneş battıktan sonra, aydınlık düzeyi yeterli miktarda düştüğünde RV2 direncinin ayarlanmasıyla sistemin bir sonraki gün için doğruya yönlendiği ve doğu sınır anahtarına temas ederek durduğu görülmüştür. Hareketli PV sistemin süreklilik testlerinin

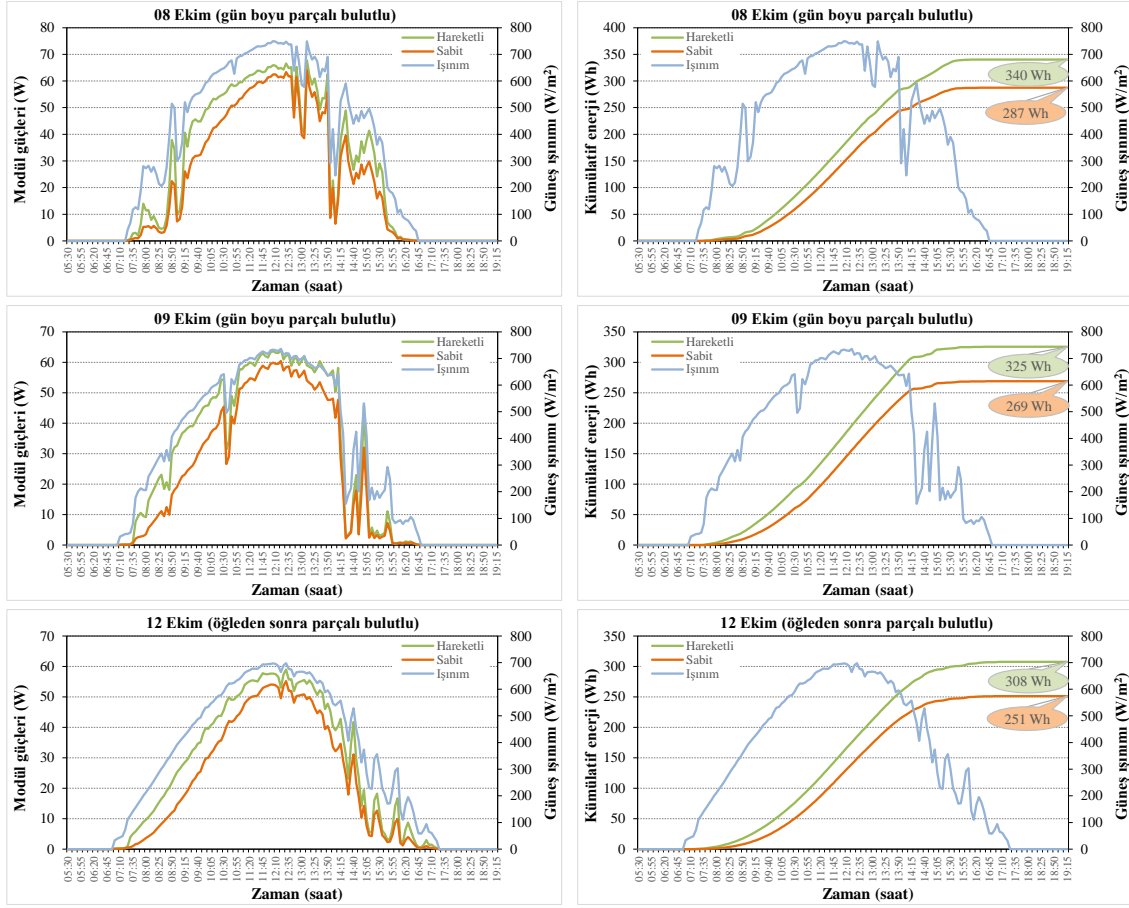
değerlendirilmesi için deney düzeneği 365 gün boyunca çalıştırılmış ve hem sabit hem de hareketli modülün üretim değerleri global radyasyon miktarı ile beraber kaydedilmiştir. Şekil 12’de çeşitli tarihlerde ve farklı hava durumlarında elde edilen modül güçleri ve kümülatif enerji değerleri karşılaştırmalı olarak 14 gün için sunulmuştur.



Şekil 12. Farklı hava durumlarında modül güçleri ve kümülatif enerjilerin karşılaştırılması.



Şekil 12. Farklı hava durumlarında modül güçleri ve kümülatif enerjilerin karşılaştırılması (devam).



Şekil 12. Farklı hava durumlarında modül güçleri ve kümülatif enerjilerin karşılaştırılması (devam).

Şekil 12’de aynı zamanda, örnek olarak ele alınan günlerde, modüller tarafından üretilen günlük bazda enerji değerlerinin kümülatif değişimi de hesaplanmıştır. Bu sayede hareketli modüle göre sağlanan verim artış oranları tespit edilmiştir. 14 güne ait kümülatif enerji değerleri ve buna bağlı gelişen verim artış oranları Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Hareketli ve sabit PV modüllerin günlük enerji üretimleri

Günler	Ortalama güneş ışınımı (kW/m <sup>2</sup> )	Günlük kümülatif enerji (Wh)		
		Hareketli modül	Sabit modül	Verimlilik artışı
25 Ocak	231	70	63	% 11
02 Nisan	572	565	426	% 32
13 Haziran	647	687	454	% 51
15 Temmuz	620	536	400	% 34
20 Temmuz	617	644	446	% 44
25 Temmuz	566	543	393	% 38
27 Temmuz	581	574	408	% 41
29 Temmuz	562	529	393	% 35
31 Temmuz	565	540	399	% 35
02 Ağustos	580	567	411	% 38
04 Eylül	539	501	397	% 26
08 Ekim	480	340	287	% 19
09 Ekim	445	325	269	% 21
12 Ekim	418	308	251	% 23



### 3.2. Tartışma

Güneş izleyici sistemler genel olarak, hava durumunun tamamen açık olduğu günlerde izleme işlemini başarılı bir şekilde yapmaktadırlar. Ancak havanın parçalı bulutlu olması durumunda, LDR sensörleri üzerine gelen ışınım değerindeki değişimlerin denetleyici devre tarafından hatalı yorumlanması, güneş açısının hatalı takip edilmesine yol açabilmektedir. Bundan dolayı Şekil 12’de, hareketli sistemin güneş izlemedeki başarımı "açık hava", "gün boyu parçalı bulutlu", "öğlene kadar parçalı bulutlu", "öğleden sonra parçalı bulutlu" ve "sabah ve öğleden sonra parçalı bulutlu" şeklinde tasnif edilen, bulutluluk düzeyi ve oranı farklı birçok hava durumu için gösterilmiştir. Grafiklerde, sabit ve hareketli modüllerin güç değerleriyle beraber global radyasyon değeri de eş zamanlı olarak sunulmuştur. Gerek örnek olarak sunulan günlerde gerekse yılın geri kalan tüm günlerinde tasarlanan sistemin güneşi başarılı bir şekilde izlediği görülmüştür. Tamamen açık, gün boyu parçalı bulutlu veya günün belirli saatlerinde bulutluluk yaşanan tüm farklı hava durumlarında, hem sabit modül hem de hareketli modül global radyasyon değişimine benzer bir değişim formu göstererek enerji üretmişlerdir. Güneş izleyici sistem tüm farklı hava durumlarında, sabit modüle göre belli oranlarda daha yüksek enerji üretirken ve bu özelliği 1 yıl boyunca süren tüm farklı güneş geliş açıları için sağlayarak, süreklilik fonksiyonu testinde de başarı kaydetmiştir.

Testlerin yürütüldüğü bir yıllık süre içinde 55 kez farklı yönlerden esen 6 m/s ve üzerinde rüzgâr meydana gelmiştir. Test sürecinde en yüksek rüzgâr hızı 3 mart gününde 7.446 m/s olarak kaydedilmiştir. Farklı yön ve hızlarda meydana gelen bu rüzgârlı hava durumlarında bile çalışmasını kararlı bir şekilde sürdüren sistemin, mekanik ve konstrüktif açıdan da iyi bir tasarıma sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Tasarlanan sistemde veriler bir yıl için kaydedilmişse de, sistemin çalışması 3 yıl boyunca gözlemlenmiştir. Batman gibi, gece gündüz arasındaki sıcaklık farkının yüksek ve yaz aylarının oldukça sıcak seyrettiği bir ilde, 3 yılın sonunda bile denetleyici kartın ve hareketli mekanizmanın çalışmaya devam ettiği görülmüştür. Ancak haricî redüksiyon sistemi için Delrin® malzemeden üretilen büyük dişlinin yüzeyinde küçük çaplı deformasyonlar tespit edilmiştir. Deney kapsamında ekonomikliği sebebiyle tercih edilen bu malzemenin, hava sıcaklığının Batman iline göre düşük seyrettiği bölgelerde daha uzun bir ömre sahip olacağı öngörülse de, genel bir çözüm olarak bu dişlinin de pirinç veya paslanmaya karşı dirençli çelik malzemeden üretilmesi tercih edilebilir. Yaz aylarının serin seyrettiği coğrafyalarda ise, sistem boyutundan kaynaklı mekanik zorlanmalara cevap verebilmesi şartıyla, sertlik, kayganlık ve boyutsal kararlılığa sahip çeşitli kompozit malzemeler kullanılabilir.

Farklı bulutluluk düzeylerine göre sınıflandırılmış ve buna bağlı gelişen farklı ortalama güneş ışınımı miktarlarına sahip 14 gün için, güneş izleyici sistemle beraber kullanılan hareketli modülün sabit açılı modüle göre belirli oranlarda verim artışı sağladığı görülmektedir. Ortalama güneş ışınımı ile verimlilik artışı arasında yakın bir ilişki bulunsa da, bulutların PV düzleminde oluşturduğu gölgelemenin etki düzeyinin ve güneşlenme süresinin de verim artışı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Örneğin, 13 haziran ve 20 temmuz günlerinde günlük ortalama global radyasyon değerleri sırasıyla 647 ve 617 W/m<sup>2</sup> iken bu günler içinde sabit modül tarafından sırasıyla 454 ve 446 Wh, hareketli modül tarafından ise sırasıyla 687 ve 644 Wh enerji üretilmiştir. Bu iki tarihte, ortalama güneş ışınımı ile sabit modül tarafından üretilen enerji değerleri arasında bir uyum mevcutken, hareketli modülün 13 haziranda 20 temmuza göre anlamlı şekilde yüksek enerji üretmesi, güneşlenme süresinin bir sonucu olarak güneşin doğuş ve batış açılarının 13 haziranda daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 2’de verilen örnek günlerde, en düşük verim artışı 25 ocak tarihinde %11 olarak gerçekleşmiştir. 25 ocak tarihinde global radyasyonun değişim seyri incelendiğinde, havanın gün boyu yoğun bulutlu olduğu görülmektedir ve bugüne ait ortalama ışınım miktarı 231 W/m<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür. Yapılan bir yıllık ölçüm sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, güneşi doğu-batı yönünde izleyen PV sistemin sabit açılı PV sisteme göre %30.84 oranında verim artışı sağladığı kaydedilmiştir.

### 4. Sonuç

PV sistemlerin ana bileşenlerinden biri olan modüllerin enerji dönüştürme oranı, kendilerini oluşturan hücrelerin üretim teknolojisi ile ilgilidir. Ancak bir modülden daha büyük enerji değerleri elde etmenin dolaylı yolları mevcuttur. Bunlardan biri, PV modüllerin güneş takip sistemleri ile beraber kullanılmalarıdır.



Bir güneş izleyici sistemin genel olarak, doğruluk, kararlılık, süreklilik gibi fonksiyonları yerine getirmesi beklenir. Bunların yanında, geri dönüş sürelerinin kabul edilebilir düzeyde olabilmesi için, tesis ve bakım-onarım maliyetlerinin düşük olması gerekmektedir. PV sistemlerin uzun yıllar boyunca farklı atmosferik şartlar altında işletmede kaldığı düşünüldüğünde, bu sistemlerle beraber kullanılan güneş izleyici sistemlerin kararlılığının test edilebilmesi için, farklı hava durumları altında uzun vadeli testlere tabi tutulmaları gerekmektedir. Bu amaçla bu çalışmada, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen doğu-batı yönünde hareket edebilen güneş izleyici sistem, uzun vadeli testlere tabi tutulmuştur. Önerilen güneş izleyici sistemin tasarımı ve üretimi sırasında karşılaşılan sorunlar ve geliştirilen çözümler ortaya konulmak üzere, uygulamanın sürücü devresi, sensör yapısı ve mekanik aksamıyla ilgili tüm detaylar açık bir şekilde belirtilmiştir.

Önerilen güneş izleyici sistemin birçok farklı hava durumundaki enerji üretimi, sabit açılı bir modül ile kıyaslanmış ve sonuçlar tablolar ve grafikler hâlinde sunularak tartışılmıştır. Uzun vadeli test sonuçlarına göre, gerçekleştirilen uygulamanın doğruluk, kararlılık ve süreklilik fonksiyonlarını yerine getirdiği anlaşılmıştır. Bununla beraber, tesis maliyetinin ve geri dönüş süresinin sistemin boyutuna ve kullanılacağı bölgenin meteorolojik rejimine göre değişebileceği söylenebilir.

Deney seti, hiçbir bakım gerektirmeden 3 yıl boyunca Batman iklim şartlarında işletmede kalabilmiştir. 3 yılın sonunda, deney setinin mekanik tasarımında kullanılan haricî redüksiyon sistemi için Delrin® malzemeden üretilen büyük dişlinin yüzeyinde küçük çaplı deformasyonlar tespit edilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında ekonomik bir çözüm olarak tercih edilen bu malzemenin, hava sıcaklığının görece düşük seyrettiği bölgelerde daha uzun bir ekonomik ömre sahip olacağı öngörülsede, genel bir çözüm olarak bu dişlinin de pirinç malzemeden üretilmesi tercih edilebilir.

Güneş izleyici sistem sayesinde günlük bazda elde edilen verim artışları arasında farklılıklar görülmektedir. Bununla beraber, yapılan bir yıllık ölçüm sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, güneşi doğu-batı yönünde izleyen modülün sabit açılı modüle göre %30.84 oranında verim artışı sağladığı kaydedilmiştir.

Önerilen güneş izleyici sistemin, araştırmacılarca yürütülen PV modüllerle ilgili deneysel çalışmalarda veya profesyonel amaçlı küçük ve orta kurulu güçlere sahip PV uygulamalarında etkili bir model olacağı düşünülmektedir. Bununla beraber önerilen modelin sahip olduğu hassasiyet dolayısıyla, heliostat ve parabolik yansıtıcıların kullanıldığı termal uygulamalar için de etkili çözümler sunacağı düşünülmektedir. Ancak, heliostat ve parabolik yansıtıcılarla güneş ışığının belirli bir noktada odaklanması esasına dayanan termal sistemlerde son derece hassas izleyicilere ihtiyaç duyulmaktadır. Önerilen güneş izleyici modelin bu tür sistemlerdeki başarımının ölçülmesi ve ihtiyaç duyulması halinde hassasiyetinin iyileştirilmesi, sonraki çalışmaların konusu olarak ele alınmalıdır.

## Kaynakça

- Aydın, A., Kayri, İ., & Aydın, H. (2022a). Determination of the performance improvement of a PV/T hybrid system with a novel inner plate-finned collective cooling with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(4), 9663-9681. doi:10.1080/15567036.2022.2136801
- Aydın, A., Kayri, İ., & Aydın, H. (2022b, October). *The Effects of TiO<sub>2</sub> Nanofluid on Efficiency and Heat Transfer Indicators of an Inner-Plate Finned Collective Cooling in a PV/T Hybrid System*. 2022 Global Energy Conference (GEC), Batman, Türkiye. doi:10.1109/GEC55014.2022.9986908
- Barbón, A., Fernández-Rubiera, J. A., Martínez-Valledor, L., Pérez-Fernández, A., & Bayón, L. (2021). Design and construction of a solar tracking system for small-scale linear Fresnel reflector with three movements. *Applied Energy*, 285, 116477. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116477
- Bhakre, S. S., Sawarkar, P. D., & Kalamkar, V. R. (2021). Performance evaluation of PV panel surfaces exposed to hydraulic cooling—A review. *Solar Energy*, 224, 1193-1209. doi:10.1016/j.solener.2021.06.083
- Bradshaw, A. M., Reuter, B., & Hamacher, T. (2013). The potential scarcity of rare elements for the Energiewende. *Green*, 3(2), 93-111. doi:10.1515/green-2013-0014
- Dehghanimadvar, M., Egan, R., & Chang, N. L. (2022). Economic assessment of local solar module assembly in a global market. *Cell Reports Physical Science*, 3(2), 100747. doi:10.1016/j.xcrp.2022.100747

- Du, X., Li, Y., Wang, P., Ma, Z., Li, D., & Wu, C. (2021). Design and optimization of solar tracker with U-PRU-PUS parallel mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 155, 104107. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.104107
- Fayaz, H., Khan, S. A., Saleel, C. A., Shaik, S., Yusuf, A. A., Veza, I., ... & Alarifi, I. M. (2022). Developments in nanoparticles enhanced biofuels and solar energy in Malaysian perspective: A Review of state of the art. *Journal of Nanomaterials*, 2022, 809157. doi:10.1155/2022/8091576
- Gabe, I. J., Bühler, A., Chesini, D., & Frosi, F. (2017, April). *Design and implementation of a low-cost dual-axes autonomous solar tracker*. 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). doi:10.1109/PEDG.2017.7972522
- Gorjian, S., Ebadi, H., Trommsdorff, M., Sharon, H., Demant, M., & Schindele, S. (2021). The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126030. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126030
- Green, M. A., Emery, K., King, D. L., Igari, S., & Warta, W. (2005). Solar cell efficiency tables (version 25). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13(1), 49-54. doi:10.1002/pip.598
- Green, M., Dunlop, E., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2021). Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(1), 3-15. doi:10.1002/pip.3371
- Gupta, S., Kalika, S., & Luisito, R. C. (2012). Maximum power point tracking for solar PV system. *Applied Mechanics and Materials*, 110, 2034-2037. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2034
- Hammoumi, A. E., Motahhir, S., Ghzizal, A. E., Chalh, A., & Derouich, A. (2018). A simple and low-cost active dual-axis solar tracker. *Energy Science & Engineering*, 6(5), 607-620. doi:10.1002/ese3.236
- International Energy Agency. (2021). IEA key world energy statistics 2021. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply> Erişim tarihi: 03.02.2023
- Jaafar, S. S., & Maarof, H. A. (2022). influence of micro-controller-based single axis solar tracker system on solar panel's performance: Case study. *The NTU Journal of Renewable Energy*, 3(1), 33-43. doi:10.56286/ntujre.v3i1.347
- Kayri, I., & Gencoglu, M. T. (2019). Predicting power production from a photovoltaic panel through artificial neural networks using atmospheric indicators. *Neural Computing and Applications*, 31, 3573-3586. doi:10.1007/s00521-017-3271-6
- Kayri, İ., & Ayyıldız, S. (2021, Kasım). *Fotovoltaik sistemlerde hücre sıcaklığının panel verimi üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırılması*. Uluslararası Mühendislik, Doğa ve Sosyal Bilimler Sempozyumu (ISENS-21), Batman, Türkiye.
- Kuttybay, N., Saymbetov, A., Mekhilef, S., Nurgaliyev, M., Tukymbekov, D., Dosymbetova, G., ... & Svanbayev, Y. (2020). Optimized single-axis schedule solar tracker in different weather conditions. *Energies*, 13(19), 5226. doi:10.3390/en13195226
- Li, S. S. (2012). *Semiconductor Physical Electronics*. New York, USA: Springer Science & Business Media.
- Motahhir, S., Hammoumi, A. E., Ghzizal, A. E., & Derouich, A. (2019). Open hardware/software test bench for solar tracker with virtual instrumentation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 9-16. doi:10.1016/j.seta.2018.11.003
- Oberbeck, L., Alvino, K., Goraya, B., & Jubault, M. (2020). IPVF's PV technology vision for 2030. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(11), 1207-1214. doi:10.1002/pip.3305
- Ogbomo, O. O., Amalu, E. H., Ekere, N. N., & Olagbegi, P. O. (2017). A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1225-1238. doi:10.1016/j.rser.2016.11.109
- Pawar, P., Pawale, P., Nagthane, T., Thakre, M., & Jangale, N. (2021). Performance enhancement of dual axis solar tracker system for solar panels using proteus ISIS 7.6 software package. *Global Transitions Proceedings*, 2(2), 455-460. doi:10.1016/j.gltip.2021.08.049
- Price, S., Margolis, R., Barbose, G., Bartlett, J., Cory, K., Couture, T., ... & James, T. (2010). *2008 solar technologies market report (No. LBNL-3490E)*. Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL). doi:10.2172/983330

- Prodhan, M. M. H., Hamid, M. K., Hussain, D., & Huq, M. F. (2016). Design, construction and performance evaluation of an automatic solar tracker. *Journal of Scientific Research*, 8(1), 1-12. doi: 10.3329/jsr.v8i1.23357 doi:10.3329/jsr.v8i1.23357
- Putra, A. R., Kusumanto, R. D., & Taqwa, A. (2019, February). *Minimum power of solar Panel Movement in Solar Tracker System Prototype*. Journal of Physics: Conference Series, 1167, 012030. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1167/1/012030
- Ramkiran, B., Sundarabalan, C. K., & Sudhakar, K. (2021). Sustainable passive cooling strategy for PV module: A comparative analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101317. doi:10.1016/j.csite.2021.101317
- Ritchie, H., & Roser, M. (2022). Where does our electricity come from? Energy mix. <https://ourworldindata.org/electricity-mix> Erişim tarihi: 03.02.2023
- Schön, J., Bissels, G. M., Mulder, P., van Leest, R. H., Gruginskie, N., Vlieg, E., ... & Lackner, D. (2022). Improvements in ultra-light and flexible epitaxial lift-off GaInP/GaAs/GaInAs solar cells for space applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(8), 1003-1011. doi:10.1002/pip.3542
- Singh, B. P., Goyal, S. K., & Kumar, P. (2021). Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2843-2849. doi:10.1016/j.matpr.2021.01.003
- Visconti, P., Costantini, P., Orlando, C., Lay-Ekuakille, A., & Cavalera, G. (2015). Software solution implemented on hardware system to manage and drive multiple bi-axial solar trackers by PC in photovoltaic solar plants. *Measurement*, 76, 80-92. doi:10.1016/j.measurement.2015.08.024
- Xu, R., Ji, X., Liu, C., Hou, J., Cao, Z., & Qian, H. (2022). Design and control of a wave-driven solar tracker. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 20(2), 1007-1019. doi:10.1109/TASE.2022.3177353
- Zaghba, L., Khennane, M., Mekhilef, S., Fezzani, A., & Borni, A. (2022). Experimental outdoor performance assessment and energy efficiency of 11.28 kWp grid tied PV systems with sun tracker installed in saharan climate: A case study in Ghardaia, Algeria. *Solar Energy*, 243, 174-192. doi:10.1016/j.solener.2022.07.045
- Zhang, Q., Zhuang, Y., Aierken, A., Song, Q., Yang, X., Zhang, S., ... & Dou, Y. (2022). Probing the displacement damage mechanism in Si, Ge, GaAs by defects evolution analysis. *Computational Materials Science*, 203, 111084. doi:10.1016/j.commatsci.2021.111084



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Öğrencilerin Siber Güvenlik Farkındalık Düzeylerinin Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Belirlenmesi

**Mahmut TOKMAK**

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Zeliha Tolunay Uygulamalı Teknoloji ve İşletmecilik Yüksekokulu  
Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 15300, Burdur, Türkiye  
Mahmut TOKMAK, [ORCID No: 0000-0003-0632-4308](https://orcid.org/0000-0003-0632-4308)  
Sorumlu yazar e-posta: mahmuttokmak@mehmetakif.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 29.09.2022  
Kabul: 16.03.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1181694](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1181694)

#### Anahtar Kelimeler

Makine öğrenmesi,  
Siber güvenlik,  
Siber güvenlik farkındalık  
düzeyi

**Öz:** Bilgi ve iletişim teknolojilerinin hızla gelişmesi ile birlikte teknoloji ve interneti kullanan cihaz sayısı artmış ve hayatın her alanına girmiştir. Teknolojideki gelişmeler kullanıcıların ve cihazların siber tehditlerle karşılaşma riskini de beraberinde getirmiştir. Bu çalışma; siber tehditlerle ilgili, öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeylerini makine öğrenme yöntemleri ile tespit etmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle istatistiksel olarak lisans öğrencilerini temsil eden örnek bir kitleden anket tekniğiyle veri toplanmıştır. Elde edilen veriler, betimsel tarama modeli benimsenerek analiz edilmiş ve analiz sonuçları çalışmada ortaya konmuştur. Sonrasında anket verilerinden oluşturulan veri seti ile Naive Bayes, Karar Ağacı, Rastgele Orman, En Yakın Komşu, XGBoost, Gradient Boost, Destek Vektör Makineleri, Çok Katmanlı Algılayıcı algoritmaları kullanılarak öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeylerinin tespiti yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda 0.7-0.98 arasında değişen doğruluk değerleri, 0.7-0.96 arasında değişen F1 skorları elde edilmiştir. En başarılı performans metrikleri 0.98 doğruluk ve 0.96 F1-skoru ile Çok Katmanlı Algılayıcı algoritması ile elde edilmiştir.

### Determination of Cyber Security Awareness Levels of Students with Machine Learning Methods

#### Article Info

Received: 29.09.2022  
Accepted: 16.03.2023  
Online August 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1181694](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1181694)

#### Keywords

Cyber security,  
Cyber security awareness  
level,  
Machine learning

**Abstract:** With the rapid development of information and communication technologies, the number of devices using technology and the internet has increased and has entered all areas of life. Developments in technology have brought the risk of users and devices encountering cyber threats. This work aims to determine students' cyber security awareness levels about cyber threats with machine learning methods. Therefore, data were collected from a sample population that was statistically representative of undergraduate students with the survey technique. The obtained data were analyzed by adopting the descriptive review model and the results of the analysis were presented in the study. Afterwards, the cyber security awareness levels of the students were determined by using the data set created from the survey data, Naive Bayes, Decision Tree, Random Forest, Nearest Neighbor, XGBoost, Gradient Boost, Support Vector Machines, Multi-Layer Perceptron algorithms. As a result of the tests performed, accuracy values ranging from 0.7-0.98 and F1 scores ranging from 0.7-0.96 has been obtained. The most successful performance metrics were obtained with the Multi-Layer Perceptron algorithm with an accuracy of 0.98 and an F1 score of 0.96.

## 1. Giriş

Bilgi Teknolojisi (BT) hayatımızın her alanına girmiştir. BT bize insan yaşamının her yönünü zenginleştiren fırsatlar ve kolaylıklar sağlamaktadır. Bugün, BT'nin olmadığı bir dünya pek hayal edilemez durumdadır. Öyle ki 2022 yılında dünya nüfusunun %69'u ve Türkiye nüfusunun %83.8'i internet kullanıcısı olarak istatistiklere geçmiştir (IWS, 2022). Türkiye İstatistik Kurumu'nun 2021'de yayınladığı raporda da 16-74 yaş aralığındaki bireylerin internet kullanma oranının %3.6 oranında arttığı bildirilmiştir. Ayrıca aynı raporda E-devlet kullanımının %58.9 olarak gerçekleştiği ve bir önceki yıla göre %7.4 oranında artış gösterdiği, internet üzerinden mal veya hizmet satın alma oranının %44.3 olduğu ve bir önceki yıla göre %7.8 oranında arttığı bildirilmiştir (TÜİK, 2021). Bunun yanı sıra mobil cihazlardaki artış ve nesnelerin interneti teknolojisiyle birlikte kullanıcılar normal dünya yaşamının yanı sıra siber dünyaya da entegre olmaya başlamışlardır (Karacı ve ark., 2017). Ancak, fırsatlar yanında zorluklar da getirebilmektedir. Siber dünyadaki bu gelişmeler, siber saldırganların ve siber saldırıların ortaya çıkması ve günden güne sayısının artması gerçeğini ortaya çıkarmıştır.

Siber güvenlik bilinci günümüzde her zamankinden daha önemli bir hale gelmiştir. Kişisel bilgilere yönelik tehditlerin arttığı ve kişisel bilgilerin her gün çalındığı, zararlı yazılımların kişilere ve kurumlara verdiği zararlar görülmektedir. Bireylerin bu konuda bilinçlendirilmesi ilk adım olarak kabul edilmektedir. Siber güvenlik farkındalık düzeyini tespit edip, uygun farkındalık programını benimseyerek saldırıların etkisi azaltılabilir (Subramaniam, 2017).

Siber güvenliğin sağlanması hususunda Makine Öğrenmesi (Machine Learning: ML) gibi teknolojik yöntemlerle önlemler alınabilmektedir. Ancak siber güvenlik alanında bir diğer faktörün de insan faktörü olduğu göz ardı edilmemelidir. Birçok siber saldırıya maruz kalmanın ve siber güvenlik zafiyetlerinin sebebi olarak insan hataları gösterilmektedir. Dolayısıyla insan faktöründeki hataları en aza indirmek için siber güvenlik farkındalığının kazandırılması gerekmektedir (Yiğit & Seferoğlu, 2019). Siber güvenlik farkındalığı "bilgi güvenliği kavramının önemi, bir kuruluşa ait verileri ve ağları korumak amacıyla yeterli düzeyde bilgi kontrolü ve uygulama sorumluluklarını anlama derecesi" olarak tanımlanmıştır. Siber güvenlik farkındalığı kavramının amaçları arasında; interneti kullanan kişileri siber güvenlik riskleri hakkında uyarmak ve kullanıcıları internet kullanımı sırasında güvenliği benimsemeye yeterince kararlı olmaları için siber güvenlik riskleri konusundaki anlayışlarını geliştirmek vardır. Bu nedenle, siber güvenlik farkındalığı faktörü insan kaynaklı hataların veya güvenlik açıklarının azaltılması, güvenliğin kişisel veya kurumsal düzeyde iyileştirilmesinde kilit bir faktördür (Quayyum ve ark., 2021).

Bu çalışmada; Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Zeliha Tolunay Uygulamalı Teknoloji ve İşletmecilik Yüksekokulu bölümlerinde öğrenim gören öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeylerinin ML yöntemleri ile tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla Siber Güvenlik Ölçeği (SGÖ) kullanılarak, anket yoluyla veriler toplanmış ve bu veriler kullanılarak bir veri seti oluşturulmuştur. Bu nedenle çalışmada anket yoluyla elde edilen veriler için öncelikle, öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeyleri ile ilgili mevcut durumun betimlenmesi yapılmış ve değişkenler arası ilişkiler incelenmiştir. Bunun yanı sıra siber güvenlik farkındalık düzeylerinin bazı değişkenlere göre farklılık gösterme durumu ortaya konmuştur. İstatistiksel incelemelerde betimsel tarama modeli benimsenmiştir (Fraenkel ve ark., 2012). İstatistiki olarak bulguların ortaya konmasından sonra Naive Bayes (NB), Karar Ağacı (Decision Tree: DT), Rastgele Orman (Random Forest: RF), K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors: KNN), XGBoost, Gradient Boost, Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine: SVM), Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi-Layer Perceptron: MLP) ML teknikleri ile siber güvenlik farkındalık düzeylerinin sınıflandırılması yapılmıştır. Kurulan ML modelleri eğitilip teste tabi tutulduktan sonra performans metrikleri ortaya konmuştur. Çalışma, öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeylerinin ML teknikleri ile kolay ve hızlı bir şekilde tespit edilmesi açısından önemlidir. Siber güvenlik farkındalık düzeylerinin ortaya konması adına istatistiksel yöntemlerle yapılan çalışmalara ek olarak, ML teknikleri ile bu farkındalık düzeylerinin belirlenmesi, yapılan eğitim ve testler sonucu elde edilen bulguların literatüre katkı yapması hedeflenmiştir.



## 2. Teorik Altyapı

### 2.1. Siber güvenlik

Siber güvenlik; “siber ortamı, kuruluşu ve kullanıcıya ait varlıkları koruma amacıyla kullanılabilir olan araçlar, güvenlik amaçlı önlemleri, uygulanan politikalar, yönergeler, risklerin yönetilmesi yaklaşımları, eylemler, verilen eğitimler, geliştirilen uygulamalar ve bu alandaki teknolojilerin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Kuruluşlar ile kullanıcıların varlıkları kavramı ise bilgi işlem cihazlarını, çalışan personeli, oluşturulmuş altyapıyı, verilen hizmetleri, geliştirilen uygulamaları, telekomünikasyon sistemlerini ve siber ortamda iletilen ve/veya depolanan bilgi ve belgelerin tamamını kapsamaktadır” (Von Solms & Van Niekerk, 2013; Alzahrani, 2021). Siber güvenlik hedefleri; erişilebilirlik”, bütünlük ve gizlilik kavramları ile ifade edilmektedir. Erişilebilirlik; bilgi ve bilgi sistemlerinin yetkili kişilerce ulaşılabilir olması olarak tanımlanmaktadır. Bütünlük; bilgilerin yetkisiz düzenlemeye veya yok edilmeye karşı korunması olarak ifade edilmektedir. Buradaki amaç bilgi ve bilgi sistemlerinin doğru, eksiksiz ve bozulmaya uğramamış olmasını temin etmektir. Gizlilik; bilginin yetkisiz olan erişimlere karşı korunması olarak tanımlanmaktadır. Bilgiye erişme hakkına sahip olanların işlem yapabilmelerini, yetkilendirilmemiş kişilerin bu işlemleri yapmalarının engellenmesi olarak tanımlanabilmektedir (Von Solms & Van Niekerk, 2013).

### 2.2. Siber güvenlik terminolojisi

Siber uzay, en yeni bilgi ve iletişim teknolojilerini kullanarak, birbirine bağlı ve bağımlı ağların yardımıyla bilgi oluşturmak, güncellemek, depolamak, paylaşmak ve kullanmak için elektronik ve elektromanyetik spektrumun kullanımı olan bilgi dünyası içindeki küresel bir alandır (Humayun ve ark., 2020). Bu küresel alanda suç içeren durumlarla ve tehditlerle karşılaşabilmektedirler. Siber güvenlik alanıyla ilgili anahtar kavramların daha iyi anlaşılması için önemli terminolojilerin bazı tanımları, siber suç ve tehditlerin en yaygın bilinenleri aşağıda verilmiştir.

*Zafiyetler (Vulnerabilities)*, bir saldırganın kötü niyetli komutlar yürütmesine, verilere yetkisiz bir şekilde erişmesine ve/veya çeşitli hizmet reddi saldırıları gerçekleştirmesine izin veren, bir sistem veya tasarımındaki hatalardır (Yalçınkaya & Küçüksille, 2021). *Tehditler (Threats)*, bir sistemdeki güvenlik açıklarından fayda sağlamak ve sistemi olumsuz yönde etkilemek için yapılan işlemlerdir (Abomhara & Køien, 2015). *Saldırılar (Attacks)*, çeşitli araçlar ve teknikler kullanılarak güvenlik açıklarından yararlanmak suretiyle bir sisteme zarar vermek veya rutin işleyişini bozmak için yapılan eylemlerdir. *Saldırganlar (Attackers)*, saldırı eylemini gerçekleştiren kişilerdir. Kötü amaçlarına ulaşmak için yaptıkları bu eylemleri kendini tatmin etmek için yada finansal bir kazanç veya ödül için başlatabilmektedirler (Abomhara & Køien, 2015; Humayun ve ark., 2020).

- *Kötü Amaçlı Yazılım (Malware)*, "malicious software" in kısaltmasıdır. Saldırganlar tarafından veri çalmak, bilgisayarlara ve bilgisayar sistemlerine zarar vermek veya onları yok etmek için geliştirilen zararlı yazılımları ifade eder. Bunlardan bazıları: virüs (virus), solucan (worm), casus yazılımlar (spyware), reklam yazılımları (adware), Truva atı (Trojan), botnet, kök kullanıcı takımı (rootkit), arka kapılar (backdoor) olarak adlandırılmaktadırlar (Khan ve ark., 2020; Khan ve ark., 2021).
- *Hizmet Reddi (DoS/DDos)* saldırıları: bir makineyi veya ağ kaynağını hedeflenen kullanıcılar için erişilemez hale getirmeyi amaçlamaktadır. Başlangıçta tek bir kaynaktan saldırı yapılmaktayken şimdilerde aynı anda birden fazla kaynaktan hedef sistemlere saldırılar gerçekleştirilmektedir (İlker, 2019).
- *Oltalama (Phishing)* bir internet kullanıcılarından hassas bilgiler toplamak için sosyal mühendislik ve teknoloji kullanan bir saldırı çeşididir. Oltalama teknikleri, e-posta, anlık mesajlar, açılır mesajlar veya Web sayfaları gibi çeşitli iletişim yöntemlerini kullanır (Khonji ve ark., 2013).
- *SQL enjeksiyon (SQL injection)* saldırısında, SQL ifadesini saldırganın lehine değiştirmek veya manipüle için uygulama aracılığıyla bir girdi dizesi enjekte edilir. Bu saldırı, veri



tabanına yetkisiz erişim ve veri tabanının manipülasyonu ve hassas verilerin ifşası dahil olmak üzere çeşitli şekillerde zarar verir. Bu saldırı, yetkisiz gruplar tarafından veri kaybına veya verilerin kötüye kullanılmasına neden olabileceğinden risklidir ve sonuç olarak işlevsellik ve gizlilik yok edilir. Ayrıca, sistem düzeyinde komutlar da bu saldırı kategorisi altında yürütülür ve yetkili kullanıcıların gerekli bilgilere erişememesine neden olur (Humayun ve ark., 2020).

- *Oturum ele geçirme (Session hijacking) ve ortadaki adam (Man-in-the-Middle)* saldırıları Man-in-the-middle (MITM, literatürde MIM, MitM, MiM veya MITMA olarak da kısaltılır), yetkisiz bir üçüncü tarafın birden çok uç nokta arasındaki iletişim kanalının kontrolünü gizlice ele geçirdiği bir saldırdır. MITM saldırganı, kurbanların iletişim trafiğini kesintiye uğratabilir, manipüle edebilir ve hatta değiştirebilir. Ayrıca, kurbanlar davetsiz misafirin farkında değildir, bu nedenle iletişim kanalının güvenli ve korumalı olduğuna inanırlar.
- *Siteler Arası Komut Dosyası (XSS)* Bu tür saldırıda, kötü niyetli bir saldırgan, müşterinin hassas verilerini çalmak için istemcinin tarayıcısında bir JavaScript kodu çalıştırmaya çalışır (Weamie, 2022).
- *Sıfır gün saldırısı (Zero-day attack)*, yamanın yayınlanmadığı veya uygulama geliştiricilerin habersiz olduğu, bilinmeyen bir güvenlik açığı tehdidini tanımlamak için kullanılan terim olarak kabul edilir (Sarker ve ark., 2020).

### 2.3. Makine öğrenme yöntemleri

Yapay zekanın alt alanı olarak tanımlanan makine öğrenimi tekniklerinin uygulamaları, eğitim, tıp, finans, imalat endüstrisi, otomotiv gibi yaşamın farklı alanlarında kullanılmaktadır. Bu alanlardan biride siber güvenlik alanıdır. Makine öğrenimi teknikleri, ağın her iki tarafında, yani saldıran tarafta ve savunan tarafta rol oynamaktadır. ML teknikleri saldıran tarafta, savunma duvarını geçmek için kullanılır. Buna karşılık, savunma tarafında, ML teknikleri hızlı ve sağlam savunma stratejileri oluşturmak için uygulanmaktadır. Makine öğrenimi teknikleri, izinsiz giriş tespit sistemi, kötü amaçlı yazılım tespiti, kimlik avı tespiti, spam tespiti ve dolandırıcılık tespiti gibi siber güvenlik tehditlerine ve saldırılara karşı mücadelede hayati bir rol oynamaktadır (Shaukat ve ark., 2020). Çalışmada kullanılan ML yöntemleri teorik olarak aşağıda verilmiştir.

- *Naive Bayes* sınıflandırıcısı, Bayes teoremine dayanan olasılıksal bir yaklaşımdır. Tüm nitelikler veya parametreler istatistiksel olarak birbirinden bağımsız olmalıdır. Mevcut etiketlenmiş örnek verileri kullanarak, sınıfı belirlenecek yeni verilerin hangi sınıfa dahil edileceğinin olasılığını hesaplar (Berrar, 2018).
- *Karar Ağacı*, normal bir ağaçta olduğu gibi karar ağaçları da kök düğümü, dallar ve yaprak düğümlerinden oluşur. Kök düğüm, tüm düğümlerin ebeveynidir ve adından da anlaşılacağı gibi, ağaçtaki en üstteki düğümdür. DT, her düğümün bir özelliği (nitelik), her bağlantının (dal) bir kararı (kural) gösterdiği ve her yaprağın bir sonucu (kategorik veya sürekli değer) gösterdiği bir yapıdır (Patel & Prajapati, 2018).
- *Rastgele Orman sınıflandırıcısı*, karar ağaçlarının birleştirilmesi esasına dayalı bir regresyon ve sınıflandırma yöntemidir. Belirli bir örnek için ormandaki her ağaç üzerinde sınıflandırma yapılır. Orman daha sonra oylama işlemiyle örneğe ait sınıfını tespit eder. RF algoritmasında, karar ağaçlarının sonuçları birleştirilir ve orman adına tek bir karar verilir (Breiman, 2001).
- *K-En Yakın Komşu sınıflandırıcısı*, basitliği ve nispeten yüksek yakınsama hızı nedeniyle sınıflandırma problemlerinde geniş bir yelpazede kullanılan bir yöntemdir. KNN, bir (x) örneğinden en yakın k örneği  $\{i_1, i_2, \dots, i_k\}$  dikkate alır ve  $\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  kümesindeki en sık sınıfa karar verir. En sık görülen sınıfın, o örneğin sınıfı olduğu varsayılır. En yakın örneği belirlemek için, KNN tekniği, saklanan örneklerin x ile k örneğinin yakınlığını ölçen bir mesafe metriğini benimser (Aldayel, 2012).

- *Gradient Boosting* algoritması, Regresyon ve sınıflandırma problemlerinde yüksek performans gösteren bir topluluk öğrenme algoritmasıdır. Algoritmada zayıf öğrenenleri iteratif olarak güçlü öğrenenlere dönüştürme amaçlanmaktadır. Gradyan artırmada üç öge vardır. Bunlar kayıp fonksiyonu, zayıf öğrenen ve toplamsal modeldir (Nusrat ve ark., 2020).
- *XGBoost algoritması*, Chen ve Guestrin tarafından geliştirilen bir topluluk ağacı algoritmasıdır (Chen & Guestrin, 2016). Friedman'ın gradyan artırma (GB) algoritmasına dayalı olarak geliştirilmiştir (Friedman, 2001; Zhou ve ark., 2021). XGBoost, tahmin performansı tek başına kullanılan bireysel tekniklerden daha iyi olan, birleştirilmiş bir model üretmek için karar ağaçlarının verimli bir şekilde uygulanmasından oluşan kolektif bir modeldir (Jabeur ve ark., 2021).
- *Destek Vektör Makineleri*, denetimli bir regresyon ve sınıflandırma tekniğidir. SVM algoritmasında, her örneğin özellik vektörü, n'nin özellik sayısı olduğu n-boyutlu örnek uzayında bulunur. Daha sonra sınıflandırmayı sağlayan üst düzlem belirlenir ve sınıflandırma yapılır. En iyi üst düzlem, birbirine en yakın örnek noktalarından eşit uzaklıkta ve sınıfları en iyi ayıran düzlem olarak tanımlanır (Pisner & Schnyer, 2020).
- *Çok Katmanlı Algılayıcı*, insan beyninin çalışma şekline esinlenilerek geliştirilmiş yapıya sahip, ileri beslemeli bir yapay sinir ağı türüdür. Giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmandan oluşur. Bu yapıda, katmanlardaki düğümler sonraki katmandaki her bir düğüm ile tam bağlantılıdır (Potur & Erginel, 2021).

## 2.4. İlgili çalışmalar

Makine öğrenimi ve yapay zeka teknikleri, siber güvenlik alanında daha çok siber güvenlik farkındalık düzeylerinin tespitinde değil de zararlı yazılımların ve atakların tespitinde kullanılmıştır. Literatürde, SVM, NB, RF, Derin İnanç Ağları (Deep Belief Network: DBN), C4.5, Adaboost, Derin Sinir Ağları (Deep Neural Network: DNN) kullanarak *spam sınıflandırması* (Li ve ark., 2018; Lighthart ve ark., 2021; Makkar & Kumar, 2021; Srinivasan ve ark., 2021), Sinir Ağları (Neural Networks: NN), Derin Öğrenme (Deep Learning: DL), RF, SVM, NB, Lojistik Regresyon (Logistic Regression: LR), XGBoost, Karesel Ayırma Analizi (Quadratic Discriminant Analysis: QDA), KNN, C4.5, Bayesçi İnanç Ağları (Bayesian Belief Network: BBN) kullanarak *dolandırıcılık tespiti* (Xuan ve ark., 2018; Makki ve ark., 2019; Mittal & Tyagi, 2019), DNN, DenseNet, CNN, Bayes Ağı (Bayesian network: BN), KNN, MLP, J48 kullanarak *kötü amaçlı yazılım tespiti* (Narudin ve ark., 2016; Venkatraman ve ark., 2019; Xue ve ark., 2019; Gibert ve ark., 2020), NB, KNN, Adaboost, DT, SVM, LR, NN, XGBoost kullanarak *ortalama saldırısı* tespiti (Sahingoz ve ark., 2019; Shahrivari ve ark., 2020) gibi siber güvenlik alanlarında çokça kullanılmıştır.

Farklı odak ve metodolojilere sahip, siber güvenlik farkındalığı ve davranış olgusunu ele alan çalışmalar daha çok istatistiksel yöntemler üzerinde durmuşlardır. Bu istatistiksel çalışmaların ortak noktası, siber güvenlik farkındalığını, siber güvenlik davranışları etkileyen çeşitli faktörleri tanımlamaları ve bu faktörlerin birbiriyle bağlantılılığını açıklamaya çalışmalarıdır. Çalışmalar geliştirilmiş çeşitli siber güvenlik ölçeklerini kullanmışlardır. Bu çalışmalarda hedef kitle ise çocuklardan başlayarak farklı eğitim düzeylerindeki öğrenciler, bilgi işlem personelleri gibi geniş bir yelpazede ele alınmıştır (Muhirwe & White, 2016; Karacı ve ark., 2017; Subramaniam, 2017; Özbek, 2019; Yiğit & Seferoğlu, 2019; Karakaya & Yetgin, 2020; Kovačević ve ark., 2020; Quayyum ve ark., 2021; Gündüzalp, 2021). Siber güvenlik kavramıyla önemli oranda benzerlikleri olan bilgi güvenliği farkındalığı ile ilgili Saridewi ve Sari (2021) Endonezya'da 488 kişiye anket uygulayarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada SVM, KNN, LR, RF, DT, NB sınıflandırma algoritmalarını kullanmışlar aynı zamanda K-Means ve DBSCAN kümeleme tekniklerini kullanmışlardır. Sınıflandırma algoritmaları ile 0.89-0.99 arasında değişen doğruluk elde etmişlerdir (Saridewi & Sari, 2021). Siber güvenlik ölçekleri ele alınarak makine öğrenme yöntemlerini kullanan çalışma, literatürde incelendiği kadarıyla, sayısal olarak çok azdır. Balan ve ark. (2018) yaptığı çalışmada siber güvenlikle ilgili çoktan seçmeli bir testi Amerika Birleşik Devletleri'nde yaşayan yetişkin internet kullanıcılarına uygulayıp aldığı cevapların doğruluğuna göre Logistic Model Tree (LMT) algoritmasını kullanmışlardır. Kimlik doğrulama farkındalığı, özel tarama bilinci, ortalama saldırısının farkındalığı,

internet erişilebilirliğinin farkındalığı konusunda 0.81-0.99 oranında doğruluk elde etmişlerdir (Balan ve ark., 2018). Khan ve ark. (2021) sosyal medya kullanıcılarının siber güvenlik farkındalığını araştıran araştırmasında kullandıkları ölçek ile çeşitli analizler yapmışlar ve beş farklı ML (LR, NB, DT, SVM, KNN) tekniği kullanmışlar ve 0.66-0.75 arasında doğruluk elde etmişlerdir (Khan ve ark., 2021).

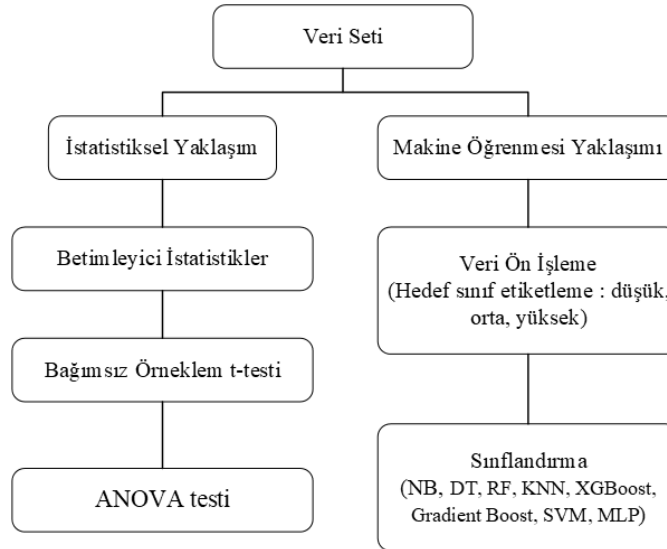
### 3. Yöntem

Siber güvenlik tehditleriyle ilgili riskleri elimine etmek veya minimum düzeye düşürmek için en önemli faktörlerden birisinin, siber güvenlik farkındalığı olduğu ifade edilmektedir (Safa ve ark., 2016). Bu bağlamda öğrencilerin siber güvenlik farkındalığı üzerinde durulması gereken bir konu olarak görülmüş ve çalışma bu nedenle gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, lisans öğrenimi gören öğrencilerin farklı değişkenlere göre siber güvenlik farkındalık seviyelerini belirlemektir. Bu amaca yönelik olarak aşağıdaki soruların cevapları aranmıştır:

- Kadın ve erkek öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeyleri arasında anlamlı bir fark var mıdır?
- Öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeyleri bölümlere göre değişmekte midir?
- Makine Öğrenme tekniklerinin, siber güvenlik farkındalık düzeylerini belirlemede performansı nedir?

Önerilen çalışma metodunda; ML algoritmalarına giriş olarak SGÖ'den elde edilen veriler kullanılmıştır. Çalışma iki farklı aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle istatistiksel olarak betimsel tarama yöntemi benimsenmiş ardından ML teknikleri ile sınıflandırma yapılmıştır. Şekil 1'de çalışmanın yöntemi özetlenmiştir.



Şekil 1. Çalışma yöntemi.

#### 3.1. Çalışma grubu

Araştırmanın evrenini Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Zeliha Tolunay Uygulamalı Teknoloji ve İşletmecilik Yüksekokulu bölümlerinde öğrenim gören öğrenciler oluşturmaktadır. Yüksekokulda 2021-2022 akademik yılı bahar döneminde kayıt yaptırıp, aktif olarak öğrenimine devam eden 734 öğrenci bulunmaktadır. Yüksekokulda 7+1 eğitim modeli uygulandığından çalışmanın yapıldığı bahar döneminde 4. Sınıf öğrencileri işletmede mesleki eğitim almaktadır. Bu nedenle işletmede mesleki eğitim alan 92 öğrenci araştırma kapsamı dışında tutulmuştur. Örneklem ise, Bucak Zeliha Tolunay Uygulamalı Teknoloji ve İşletmecilik Yüksekokulu bölümlerinde öğrenim

gören 210 öğrenciden oluşmaktadır. Çalışmaya katılan öğrenci grubunun demografik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Demografik özellikler

Bölümler	Cinsiyet		Toplam
	Erkek	Kadın	
Yönetim Bilişim Sistemleri	59	37	96
Muhasebe ve Finansal Yönetim	18	14	32
Gümrük İşletme	20	14	34
Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri	22	2	24
Uluslararası Ticaret	12	12	24
<b>Toplam</b>	<b>131</b>	<b>79</b>	<b>210</b>

### 3.2. Veri toplama araçları

Veri toplamak için kullanılan ölçme aracı; cinsiyet, bölüm, sınıfa yönelik soruların olduğu kişisel bilgi bölümü ve [Arpaci & Sevinç \(2022\)](#) tarafından geliştirilen Siber Güvenlik Ölçeğinden (SGÖ) oluşmaktadır. Toplam 24 madde bulunan 5’li likert tipindeki ölçek, Gizlilik, Kontrol/Sahiplik, Bütünlük, Gerçeklik, Erişilebilirlik ve Fayda olmak üzere 6 faktörden oluşmaktadır. Ölçekteki ifadeler Kesinlikle Katılıyorum (5), Katılıyorum (4), Kararsızım (3), Katılmıyorum (2), Kesinlikle Katılmıyorum (1) şeklindedir. Ölçek puanlanırken; 17 normal madde ve 7 ters madde için farklı hesaplama yapılmıştır. Normal maddeler için puanlama “Kesinlikle Katılıyorum” seçeneğinden başlayarak 5’ten 1’e doğru yapılmış, ters maddeler için puanlama ise “Kesinlikle Katılmıyorum” seçeneğinden başlayarak 5’ten 1’e doğru yapılmıştır. SGÖ’nin tamamı için Cronbach Alfa iç güvenirlik katsayısı 0.88, Gizlilik faktörü için 0.784, Kontrol/Sahiplik faktörü için 0.810, Bütünlük faktörü için 0.795, Gerçeklik faktörü için 0.784, Erişilebilirlik faktörü için 0.734 ve Fayda faktörü için 0.735’dir. Bu çalışmada ise Ölçeğin Cronbach Alfa iç güvenirlik katsayısı 0.818 olarak bulunmuştur. Faktörlere göre ise sırasıyla 0.819, 0.912, 0.607, 0.826, 0.721 ve 0.714 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerler orijinal ölçeğin değerlerine benzer değerlerdir. Hesaplanan değerlere göre ölçeğin tamamı ve 6 faktöre göre yapılan ölçümlerin yeterli güvenirliğe sahip olduğu söylenebilir.

### 3.3. Verilerin analizi

Veriler, dijital ortamda çevrimiçi olarak toplanmıştır. Verilerin analizi için yapılan istatistiksel analizlerde IBM SPSS yazılımı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler için 0.05 anlamlılık düzeyi kullanılmıştır. SGÖ ölçeğindeki maddelere ilişkin ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmış ve ölçekten elde edilen puanların normal dağılım gösterip göstermediğini tespit etmek amacıyla normallik testi yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. İncelemede çarpıklık (Skewness) ve basıklık (Kurtosis) katsayıları esas alınmıştır. Çizelge 2’de gösterilen çarpıklık ve basıklık katsayılarının kabul değerleri olan -1.5 ile +1.5 arasında olması nedeniyle verilerin normal dağıldığı kabul edilmiştir ([Tabachnick & Fidell, 2013](#)). Buna göre veri analizinde öğrencilerin cinsiyetleri bakımından farkın ortaya konulması amacıyla bağımsız örneklem t-testi, bölümlere göre gruplar arasındaki farkın tespiti için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) testi kullanılmıştır. Ayrıca gruplar arası farkın kaynağını belirlemek amacıyla Games-Howell testi uygulanmıştır.

ML ile sınıflandırma için kurulan modellerin tasarımı Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her model üzerindeki tüm deneyler, 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirme, eğitim için 9 veriyi ve test için 1 veriyi ayırmaktadır. ML için ön hazırlık dosya yükleme, performans metriklerinin hesaplanmasında veri görselleştirme gibi işlemlerde Python numpy, sklearn, pandas, statistics, matplotlib.pyplot kütüphaneleri kullanılmıştır. Önerilen ML mimarilerinden RF, NB, SVM, DT, NN, Gradient Boost, MLP sınıflandırıcıları için sklearn kütüphanesi, XGBoost sınıflandırıcı için xgboost kütüphanesi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ML yöntemlerine ait deneysel sonuçlar elde edilirken kullanılan model parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir. KNN ve NB algoritmalarında ise “default” parametreler benimsenmiştir. Bu

parametreler belirlenirken veri sayısı, öznelik sayısı, çıkış sayısı göz önünde bulundurularak çeşitli denemeler sonucunda belirlenmiştir.

Çizelge 2. Model hiperparametreleri

Model Adı	Parametreler
SVM	kernel=poly, degree=3, gamma="auto", cache_size=40, C=1
DT	max_depth=5
RF	max_depth=9, n_estimators=100, max_features=1
Gradient Boost	n_estimators=100, learning_rate=1.0, max_depth=1, random_state=0
XGBoost	max_depth=3, n_estimators=100, learning_rate=1, random_state=0, booster=gtree
MLP	hidden_layer_sizes=5, max_iter=250, alpha=1e-4, solver="sgd" random_state=1, n_iter_no_change=50, learning_rate_init=0.01, momentum=0.3

Oluşturulan modellerin performansını değerlendirmek için kullanılan; doğruluk değeri Denklem 1'de, kesinlik (precision) değeri Denklem 2'de, duyarlılık (recall) değeri Denklem 3'te, F1-skoru ise Denklem 4'te gösterilmiştir.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{FN} + \text{TN}} \quad (1)$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (2)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (3)$$

$$F1\text{-score} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (4)$$

#### 4. Bulgular

Çalışmada kullanılan SGÖ'den elde edilen betimleyici istatistik değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Betimleyici istatistikler

Faktörler	N	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ss	Çarpıklık	Basıklık
Gizlilik	210	1.67	5	3.8571	1.08428	-1.084	.491
Kontrol/Sahiplik	210	2.4	5	4.0933	1.13915	-1.502	1.216
Bütünlük	210	1	5	3.1583	.85957	-.402	.598
Gerçeklik	210	1	5	2.1162	1.01010	1.104	.698
Erişilebilirlik	210	1	5	3.1655	1.13278	-.310	-.812
Fayda	210	1	5	3.5317	1.01624	-.736	.305

Çizelge 4'e göre öğrencilerin faktörlere göre aldığı puanların genel ortalaması 3.27 olarak bulunduğundan öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeylerinin orta seviyede olduğu söylenebilir.

Veri analizinde öğrencilerin cinsiyetleri açısından anlamlı bir farklılık olup olmadığının ortaya konulması adına bağımsız örneklem t-testi yapılmış ve Çizelge 4'te faktörlere ait elde edilen değerler gösterilmiştir.

Çizelge 4. Öğrencilerin siber güvenlik farkındalıkları bağımsız örneklem t-testi sonuçları

Faktörler	Cinsiyet	N	X	Ss	t	sd	p
Gizlilik	Erkek	131	3.8015	1.16265	-.957	208	.340
	Kadın	79	3.9494	.93992			
Kontrol/Sahiplik	Erkek	131	3.9786	1.24165	-1.891	208	.060
	Kadın	79	4.2835	.92132			
Bütünlük	Erkek	131	3.0458	.92497	-2.473	208	.014
	Kadın	79	3.3449	.70518			
Gerçeklik	Erkek	131	2.1588	1.03796	.786	208	.433
	Kadın	79	2.0456	.96447			
Erişilebilirlik	Erkek	131	3.1870	1.24589	.354	208	.724
	Kadın	79	3.1297	.92149			
Fayda	Erkek	131	3.5776	1.05800	.842	208	.401
	Kadın	79	3.4557	.94459			

Çizelge 4'e göre öğrencilerin cinsiyetleri açısından siber güvenlik farkındalığında istatistiki olarak Gizlilik, Kontrol/Sahiplik, Gerçeklik, Erişilebilirlik, Fayda faktörlerinde anlamlı bir farklılık oluşturmadığı değerlendirilmiştir ( $t = -1.891 - 0.842$ ;  $p > .05$ ). Bütünlük faktörüne göre ise öğrencilerin cinsiyetleri açısından siber güvenlik farkındalığında anlamlı bir farklılık tespit edilmiştir ( $t = -2.473$ ;  $p < .05$ ).

Çalışmaya katılan öğrencilerin bölüm değişkeni Yönetim Bilişim Sistemleri, Muhasebe ve Finansal Yönetim, Gümrük İşletme, Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri, Uluslararası Ticaret olarak ayarlanmıştır. Bölüm değişkeni ile ilgili olarak Çizelge 5'te, öğrencilerin bölümlerine göre grupların homojen dağılıp dağılmadığını belirlemek için yapılan homojenlik testi sonuçları, Çizelge 6'da ise gruplar arası farklılaşmayı tespit etmek için yapılan ANOVA testi verilmiştir.

Çizelge 5. Öğrencilerin bölümleri için yapılan homojenlik testi

Levene İstatistiği	df1	df2	p
13.744	4	205	.001

Grupların homojenliğini belirlemek için yapılan Levene testi sonucu p değeri  $0.001 < 0.05$  olarak bulunmuş ve bölümlere göre gruplar arası varyansların homojenliği testinde varyansların homojen olmadığı değerlendirilmiştir.

Çizelge 6. Bölümlere göre öğrencilerin siber güvenlik farkındalıkları ANOVA testi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar arası	16.21	4	4.053	8.315	.001
Gruplar içi	99.911	205	0.487		
Toplam	116.121	209			

Çizelge 6'da verilen ANOVA testi sonucu, gruplar arası gözlenen farklılığın istatistiksel olarak anlamlı olduğu ortaya konulmuştur ( $F(4-205)=8.314$ ,  $p < .05$ ). Bu farkın grupların hangileri arasında olduğunun saptanması amacıyla Games-Howell testi yapılmıştır.

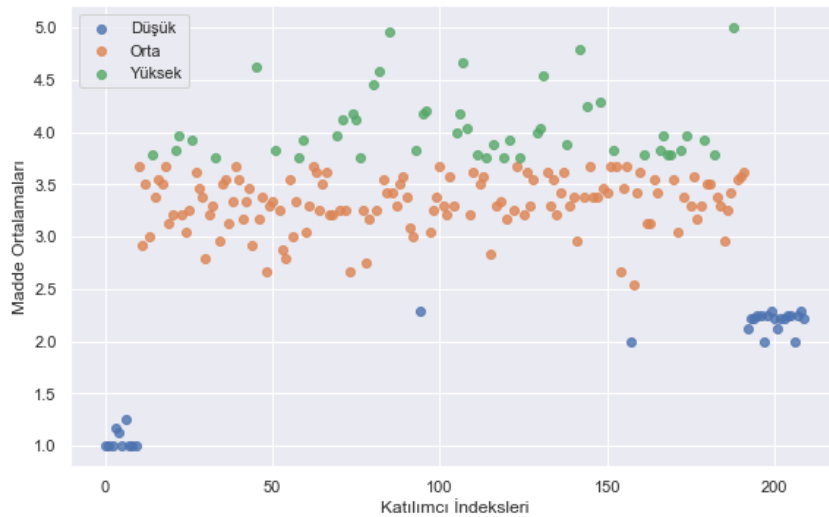
Çizelge 7'de gruplar arası karşılaştırmalar yapılmış ve karşılaştırılan bu grupların ortalama puanları arasındaki farklarına bakılmıştır. Bu değerlere bakıldığında Yönetim Bilişim Sistemleri-Muhasebe ve Finansal Yönetim, Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri- Muhasebe ve Finansal Yönetim, Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri-Uluslararası Ticaret bölümleri arasında anlamlı farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu da Muhasebe ve Finansal Yönetim bölümünün siber güvenlik farkındalık puanlarının düşük olduğunun bir göstergesidir.



Çizelge 7. Öğrencilerin bölümleri arasındaki farklılığın anlamlılığına ilişkin Games-Howell sonuçları

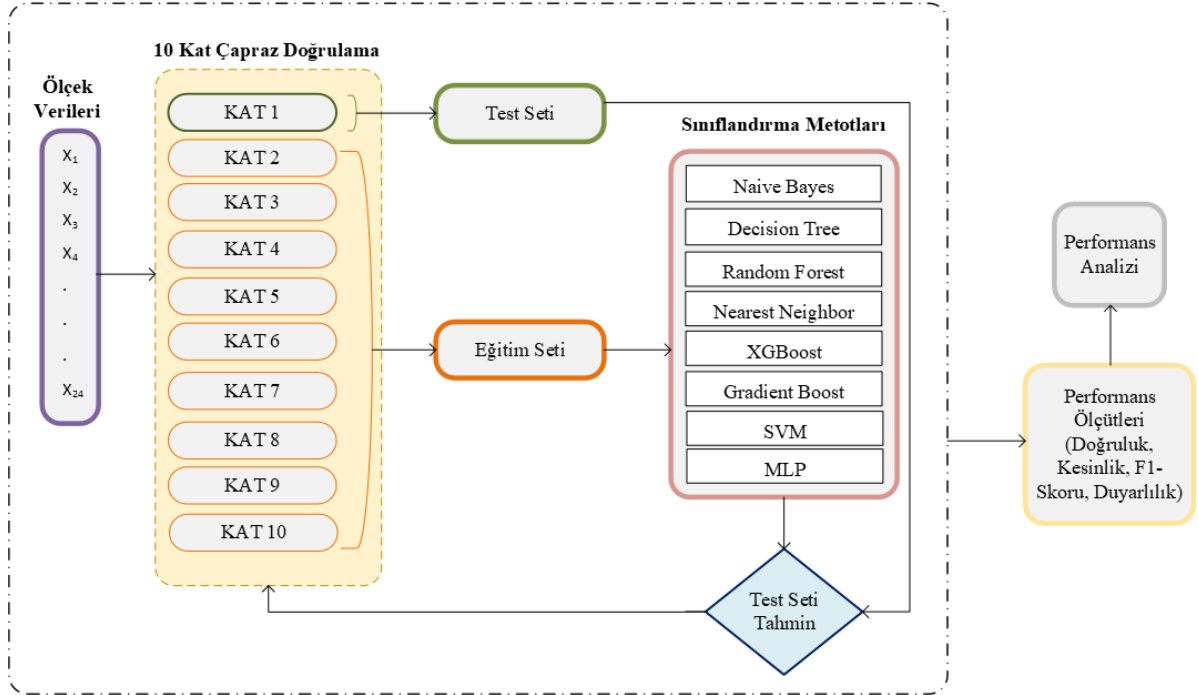
Bölüm	Bölüm	Ortalama Fark	Ss	p
Yönetim Bilişim Sistemleri	Muhasebe ve Finansal Yönetim	.73655*	0.19916	0.006
	Gümrük İşletme	0.04177	0.15276	0.999
	Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri	-0.16319	0.09305	0.41
	Uluslararası Ticaret	0.27257	0.13395	0.272
Muhasebe ve Finansal Yönetim	Yönetim Bilişim Sistemleri	-.73655*	0.19916	0.006
	Gümrük İşletme	-.69478*	0.23733	0.038
	Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri	-.89974*	0.20408	<.001
	Uluslararası Ticaret	-0.46398	0.22568	0.255
Gümrük İşletme	Yönetim Bilişim Sistemleri	-0.04177	0.15276	0.999
	Muhasebe ve Finansal Yönetim	.69478*	0.23733	0.038
	Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri	-0.20496	0.15911	0.7
	Uluslararası Ticaret	0.2308	0.18601	0.728
Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri	Yönetim Bilişim Sistemleri	0.16319	0.09305	0.41
	Muhasebe ve Finansal Yönetim	.89974*	0.20408	<.001
	Gümrük İşletme	0.20496	0.15911	0.7
	Uluslararası Ticaret	.43576*	0.14115	0.029
Uluslararası Ticaret	Yönetim Bilişim Sistemleri	-0.27257	0.13395	0.272
	Muhasebe ve Finansal Yönetim	0.46398	0.22568	0.255
	Gümrük İşletme	-0.2308	0.18601	0.728
	Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri	-.43576*	0.14115	0.029

ML tekniklerinin, siber güvenlik farkındalık düzeylerini belirlemede öncelikle ölçek verileri eğitim ve test için hazırlanmıştır. Bu amaçla ölçeğe her katılan kişinin ölçekten aldığı toplam ortalama puan hesaplanmış ve bu değerler üç alt grupta kategorize edilmiştir: düşük (1-2.33), orta (2.34-3.67) ve yüksek (3.68-5) (D’Silva ve ark., 2010; Hassan ve ark., 2011; Ramli ve ark., 2013). Ankete katılan her öğrencinin verdiği cevaplar puanlanmış ve kategorize edilen değerlere göre, öğrencinin siber güvenlik seviyesi “düşük”, “orta”, “yüksek” olarak etiketlenmiştir. Kategorize edilen değerler Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Veri seti dağılımı.

Ölçekteki her bir soru, tasarlanan sınıflandırıcı için giriş olarak verilmiştir. Sınıflandırıcının eğitimi ve testinde 10 katlı çapraz doğrulama kullanılmıştır. Sınıflandırmanın çıkışında ise öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeyleri düşük, orta, yüksek olarak alınmış ve performans metrikleri elde edilmiştir. Önerilen ML yaklaşımı Şekil 3’te gösterilmiştir.

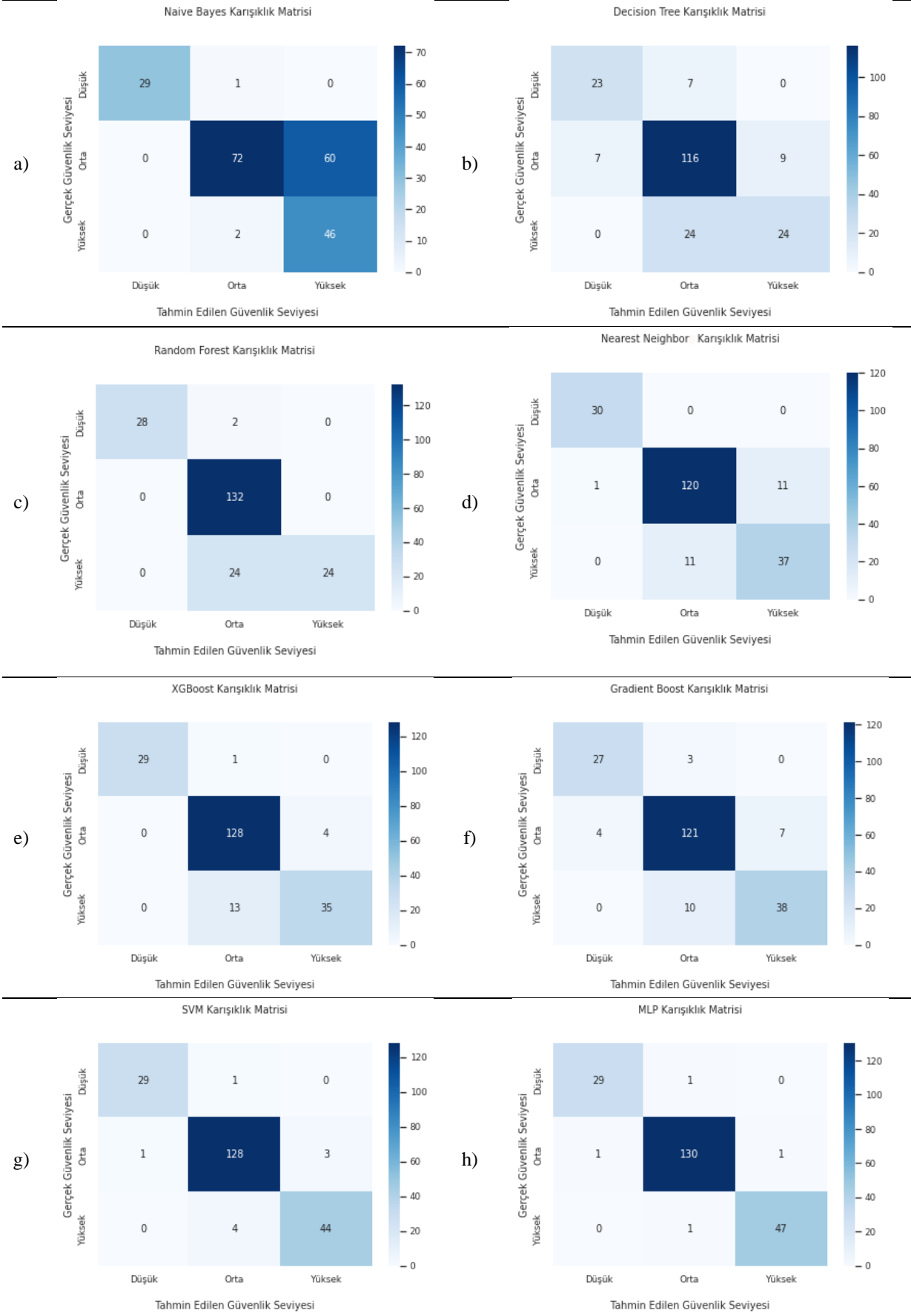


Şekil 3. Önerilen çalışmanın ML modeli.

Araştırmada kullanılan tüm modellere ait eğitim ve test sonuçlarına ait metrikler Çizelge 8’de gösterilmiştir. Yapılan testler sonucunda 0.7-0.98 arasında değişen doğruluk değerleri, 0.7-0.96 arasında değişen F1 skorları elde edilmiştir. Elde edilen test ve eğitim skorları 10 kat çapraz doğrulama sonucunda elde edilen ortalama değerlerdir. Çizelge 8’de ortalama skorların yanı sıra her bir algoritmaya ait test ve eğitim skorlarının Standart sapma değerleri verilmiştir. Şekil 4’te ise çalışmada kullanılan modellerin eğitilmesi sonucunda yapılan testler sonucunda elde edilen karışıklık matrisleri verilmiştir.

Çizelge 8. Eğitim ve test performans metrikleri

Algoritmalar		Test				Eğitim			
		Doğruluk	Kesinlik	F1 Skoru	Duyarlılık	Doğruluk	Kesinlik	F1-Skoru	Duyarlılık
NB	Ort.	0.7000	0.7914	0.7369	0.8143	0.7254	0.8170	0.7807	0.8520
	Ss	0.0641	0.0418	0.0580	0.0658	0.0143	0.0066	0.0111	0.0081
DT	Ort.	0.7905	0.7538	0.7048	0.7166	0.9122	0.9352	0.9048	0.8920
	Ss	0.1048	0.1568	0.1549	0.1498	0.0297	0.0276	0.0364	0.0431
RF	Ort.	0.8476	0.8867	0.7858	0.7713	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	Ss.	0.0873	0.1043	0.0934	0.0919	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Gradient Boost	Ort.	0.8857	0.8770	0.8597	0.8718	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	Ss.	0.0713	0.1050	0.0907	0.0547	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
KNN	Ort.	0.8905	0.8478	0.8571	0.8832	0.9550	0.9544	0.9552	0.9563
	Ss.	0.0641	0.1047	0.0990	0.0894	0.0049	0.0073	0.0039	0.0044
XGBoost	Ort.	0.9143	0.9367	0.9025	0.8943	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	Ss.	0.0732	0.0428	0.0634	0.0671	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SVM	Ort.	0.9571	0.9513	0.9324	0.9362	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	Ss	0.0256	0.0523	0.0589	0.0621	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
MLP	Ort.	0.9810	0.9711	0.9668	0.9749	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	Ss	0.0233	0.0504	0.0482	0.0490	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



Şekil 4. Karışıklık matrisleri a: NB, b: DT, c: RF, d: KNN, e: XGBoost, f: Gradient Boost, g: SVM, h: MLP.

## 5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Zeliha Tolunay Uygulamalı Teknoloji ve İşletmecilik Yüksekokulu bölümlerinde öğrenim gören öğrencilerin siber güvenlik farkındalık düzeyleri makine öğrenme yöntemleriyle belirlenmiştir. ML algoritmalarına giriş olarak SGÖ verileri kullanıldığından çalışmada öncelikle istatistiksel olarak betimsel tarama yöntemi benimsenmiş ardından ML teknikleri ile sınıflandırma yapılmıştır.

SGÖ'den elde edilen ortalama puanlar incelendiğinde, öğrencilerin siber güvenliğe yönelik farkındalıklarının genel itibarıyla orta düzeyde olduğu görülmektedir. Ancak ölçeğin gerçeklik faktöründeki ortalama puanların düşük olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki puan düşüklüğünün, spesifik olarak ortalama saldırılarının nasıl gerçekleştiği ile ilgili öğrencilerin yeterli bilgi birikimine sahip olmamalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çalışma sonuçlarına göre erkek öğrenciler ile kadın öğrencilerin siber güvenlik farkındalıkları bakımından 5 faktöre göre anlamlı bir farklılık tespit edilememiştir. Ancak Bütünlük faktöründe siber güvenlik farkındalıkları bakımından anlamlı bir farklılık görülmüştür. Kadın öğrencilerin siber ortamda saklanan verilerin güvenliğine daha şüpheli bir bakış açısı gösterdiği düşünülmektedir. Öğrencilerin bölümleri arasında siber güvenlik farkındalıkları bakımından anlamlı farklılıklar olduğu görülmüştür. Bilişim sistemleri ile ilgili bölümlerin, diğer bölümlere göre siber güvenlik farkındalıklarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise lisans eğitimi sırasında alınan derslerin ve içeriklerinin etkisi olarak değerlendirilmiştir.

Öğrencilerin ölçekten aldıkları puanlar düşük, orta ve yüksek olarak etiketlenmiş ve ölçek soruları RF, NB, SVM, DT, NN, XGBoost, Gradient Boost, MLP algoritmalarına giriş olarak verilmiştir. Daha sonra kurulan her bir model eğitilip test edildikten sonra her bir öğrencinin siber güvenlik farkındalık düzeyleri tespit edilmiştir.

Düşük, orta, yüksek olarak etiketleme, düşük 1-2.33, orta 2.34-3.67 ve yüksek 3.68-5 puan ortalaması aralığına göre yapılmıştır. Çalışmada kullanılan sınıflandırma yöntemlerindeki karışıklık matrisleri ve performans metrikleri incelendiğinde; NB, DT, RF, KNN, XGBoost, Gradient Boost algoritmalarının orta ve yüksek etiketli verilerin sınıflandırılmasında başarısız kaldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen performans metriklerine göre NB algoritması ile 0.70, DT algoritması ile 0.7905, RF algoritması ile 0.8476, Gradient Boost algoritması ile 0.8857, KNN algoritması ile 0.8905, XGBoost algoritması ile 0.9143, SVM algoritması ile 0.9571, MLP algoritması ile 0.981 doğruluk değerleri elde edilmiştir. MLP ve SVM algoritmalarının hem doğruluk hem de F1-skoruna bakıldığında diğer algoritmalara göre performansının yüksek olduğu görülmüştür. Siber güvenlik farkındalık seviyelerinin belirlenmesinde ML tekniklerinin kullanılabileceği, geliştirilen veya geliştirilecek olan farklı ML teknikleriyle performans metriklerinin daha yüksek skorlara çıkarılabileceği öngörülmektedir.

### Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada ulusal ve uluslararası etik kurallara uyulmuştur. Bu çalışma, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulu (GO 2022/824) tarafından etik açıdan onaylanmıştır.

### Kaynakça

- Abomhara, M., & Kœien, G. M. (2015). Cyber Security and the Internet of Things: Vulnerabilities, Threats, Intruders and Attacks. *Journal of Cyber Security and Mobility*, 4(1), 65-88.
- Aldayel, M. S. (2012, December). *K-Nearest Neighbor classification for glass identification problem*. 2012 International Conference on Computer Systems and Industrial Informatics, Sharjah, United Arab Emirates. doi:10.1109/ICCSII.2012.6454522
- Alzahrani, L. (2021). Statistical analysis of cybersecurity awareness issues in higher education institutes. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(11), 630-637. doi:10.14569/IJACSA.2021.0121172
- Arpaci, I., & Sevinc, K. (2022). Development of the cybersecurity scale (CS-S): Evidence of validity and reliability. *Information Development*, 38(2), 218-226. doi:10.1177/0266666921997512

- Balan, S., Gawand, S., & Purushu, P. (2018). Application of machine learning classification algorithm to cybersecurity awareness. *Information Technology & Management Science (RTU Publishing House)*, 21, 45-48. doi:10.7250/itms-2018-0006
- Berrar, D. (2018). Bayes' theorem and naive Bayes classifier. In S. Ranganathan, M. Gribskov, K. Nakai, & C. Schönbach (Eds.), *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology: ABC of Bioinformatics* (pp. 403-412). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publisher. doi:10.1016/B978-0-12-809633-8.20473-1
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32. doi:10.1023/A:1010933404324
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016, August). *Xgboost: A scalable tree boosting system*. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco California, USA. doi:10.1145/2939672.2939785
- D'Silva, J. L., Samah, B. A., Shaffril, H. A. M., & Hassan, M. A. (2010). Factors that influence attitude towards ICT usage among rural community leaders in Malaysia. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(10), 5214-5220.
- Fraenkel, J. R., Wallen, N. E., & Hyun, H. (2012). *How to design and evaluate research in education* (C. 7). New York, USA: McGraw-hill Education.
- Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29(5), 1189-1232. doi:10.1214/aos/1013203451
- Gibert, D., Mateu, C., & Planes, J. (2020). HYDRA: A multimodal deep learning framework for malware classification. *Computers & Security*, 95, 101873. doi:10.1016/j.cose.2020.101873
- Gündüzalp, C. (2021). Üniversite çalışanlarının dijital veri ve kişisel siber güvenlik farkındalıkları (bilgi işlem daire başkanlıkları örneği). *Journal of Computer and Education Research*, 9(18), 598-625. doi:10.18009/jcer.907022
- Hassan, M. A., Samah, B. A., Shaffril, H. M., & D'Silva, J. L. (2011). Perceived usefulness of ICT usage among JKKK members in Peninsular Malaysia. *Asian Social Science*, 7(10). doi:10.5539/ass.v7n10p255
- Humayun, M., Niazi, M., Jhanjhi, N. Z., Alshayeb, M., & Mahmood, S. (2020). Cyber security threats and vulnerabilities: A systematic mapping study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(4), 3171-3189. doi:10.1007/s13369-019-04319-2
- IWS. (2022). Internet World Stats. <https://www.internetworldstats.com/europa2.htm#tr> Erişim Tarihi: 18 Ağustos 2022.
- İlker, K. (2019). Kaba kuvvet saldırı tespiti ve teknik analizi. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 2(2), 61-69. doi:10.35377/saucis.02.02.561844
- Jabeur, S. B., Mefteh-Wali, S., & Viviani, J.-L. (2021). Forecasting gold price with the XGBoost algorithm and SHAP interaction values. *Annals of Operations Research*, 1-21. doi:10.1007/s10479-021-04187-w
- Karacı, A., Akyüz, H. İ., & Bilgici, G. (2017). Üniversite öğrencilerinin siber güvenlik davranışlarının incelenmesi. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 25(6), 2079-2094. doi:10.24106/kefdergi.351517
- Karakaya, A., & Yetgin, M. A. (2020). Karabük üniversitesi çalışanlarına yönelik kişisel siber güvenlik üzerine araştırma. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(2), 157-172. doi:10.47147/ksuiibf.816171
- Khan, F., Ncube, C., Ramasamy, L. K., Kadry, S., & Nam, Y. (2020). A digital DNA sequencing engine for ransomware detection using machine learning. *IEEE Access*, 8, 119710-119719. doi:10.1109/ACCESS.2020.3003785
- Khan, N. F., Ikram, N., Murtaza, H., & Asadi, M. A. (2021). Social media users and cybersecurity awareness: Predicting self-disclosure using a hybrid artificial intelligence approach. *Kybernetes*, 52(1), 401-421. doi:10.1108/K-05-2021-0377
- Khonji, M., İraqi, Y., & Jones, A. (2013). Phishing detection: A literature survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(4), 2091-2121. doi:10.1109/SURV.2013.032213.00009
- Kovačević, A., Putnik, N., & Tošković, O. (2020). Factors related to cyber security behavior. *IEEE Access*, 8, 125140-125148. doi:10.1109/ACCESS.2020.3007867
- Li, Y., Nie, X., & Huang, R. (2018). Web spam classification method based on deep belief networks. *Expert Systems with Applications*, 96, 261-270. doi:10.1016/j.eswa.2017.12.016

- Ligthart, A., Catal, C., & Tekinerdogan, B. (2021). Analyzing the effectiveness of semi-supervised learning approaches for opinion spam classification. *Applied Soft Computing*, 101, 107023. doi:10.1016/j.asoc.2020.107023
- Makkar, A., & Kumar, N. (2021). PROTECTOR: An optimized deep learning-based framework for image spam detection and prevention. *Future Generation Computer Systems*, 125, 41-58. doi:10.1016/j.future.2021.06.026
- Makki, S., Assaghir, Z., Taher, Y., Haque, R., Hacid, M.-S., & Zeineddine, H. (2019). An experimental study with imbalanced classification approaches for credit card fraud detection. *IEEE Access*, 7, 93010-93022. doi:10.1109/ACCESS.2019.2927266
- Mittal, S., & Tyagi, S. (2019, January). *Performance evaluation of machine learning algorithms for credit card fraud detection*. 2019 9th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence). doi:10.1109/CONFLUENCE.2019.8776925
- Muhirwe, J., & White, N. (2016). Cybersecurity awareness and practice of next generation corporate technology users. *Issues in Information Systems*, 17(2), 183-192. doi:10.48009/2\_iis\_2016\_183-192
- Narudin, F. A., Feizollah, A., Anuar, N. B., & Gani, A. (2016). Evaluation of machine learning classifiers for mobile malware detection. *Soft Computing*, 20(1), 343-357. doi:10.1007/s00500-014-1511-6
- Nusrat, F., Uzbaş, B., & Baykan, Ö. K. (2020). Prediction of diabetes mellitus by using gradient boosting classification. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Ejosat Special Issue 2020, 268-272. https://doi.org/10.31590/ejosat.803504
- Özbek, Y. (2019). *Öğretmen adaylarının siber güvenlik farkındalıklarının incelenmesi*. (Doktora Tezi), Necmettin Erbakan Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Patel, H. H., & Prajapati, P. (2018). Study and analysis of decision tree based classification algorithms. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 6(10), 74-78. doi:10.26438/ijcse/v6i10.7478
- Pisner, D. A., & Schnyer, D. M. (2020). Chapter 6 - Support Vector Machine. A. Mechelli & S. Vieira (Ed.), *Machine Learning* (pp. 101-121). Cambridge, USA: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-815739-8.00006-7
- Potur, E. A., & Erginel, N. (2021). Kalp yetmezliği hastalarının sağ kalımlarının sınıflandırma algoritmaları ile tahmin edilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 112-118. doi:10.31590/ejosat.902357
- Quayyum, F., Cruzes, D. S., & Jaccheri, L. (2021). Cybersecurity awareness for children: A systematic literature review. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 30, 100343. doi:10.1016/j.ijcci.2021.100343
- Ramli, S. A. B., Omar, S. Z., Bolong, J., D'Silva, J. L., & Shaffril, H. A. M. (2013). Influence of behavioral factors on mobile phone usage among fishermen: The case of Pangkor Island Fishermen. *Asian Social Science*, 9(5), 162. doi:10.5539/ass.v9n5p162
- Safa, N. S., Von Solms, R., & Futcher, L. (2016). Human aspects of information security in organisations. *Computer Fraud & Security*, 2016(2), 15-18. doi:10.1016/S1361-3723(16)30017-3
- Sahingoz, O. K., Buber, E., Demir, O., & Diri, B. (2019). Machine learning based phishing detection from URLs. *Expert Systems with Applications*, 117, 345-357. doi:10.1016/j.eswa.2018.09.029
- Saridewi, V. S., & Sari, R. F. (2021). Implementation of machine learning for human aspect in information security awareness. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(4), 1126-1142. doi:10.5937/jaes0-28530
- Sarker, I. H., Kayes, A. S. M., Badsha, S., Alqahtani, H., Watters, P., & Ng, A. (2020). Cybersecurity data science: An overview from machine learning perspective. *Journal of Big Data*, 7, 41. doi:10.1186/s40537-020-00318-5
- Shahrivari, V., Darabi, M. M., & Izadi, M. (2020). Phishing detection using machine learning techniques. *arXiv preprint arXiv:2009.11116*. doi:10.48550/arXiv.2009.11116
- Shaukat, K., Luo, S., Varadharajan, V., Hameed, I. A., Chen, S., Liu, D., & Li, J. (2020). Performance comparison and current challenges of using machine learning techniques in cybersecurity. *Energies*, 13(10), 2509. doi:10.3390/en13102509



- Srinivasan, S., Ravi, V., Alazab, M., Ketha, S., Al-Zoubi, A., & Padannayil, S. K. (2021). Spam emails detection based on distributed word embedding with deep learning. In Y. Maleh, M. Shojafar, M. Alazab, & Y. Baddi (Eds.), *Machine Intelligence and Big Data Analytics for Cybersecurity Applications* (pp. 161-189). Switzerland: Springer Cham.
- Subramaniam, S. R. (2017, December). *Cyber security awareness among Malaysian pre-university students*. Proceeding of the 6th Global Summit on Education, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using Multivariate Statistics*. Boston, USA: Pearson Education.
- TÜİK. (2021). Türkiye İstatistik Kurumu. [https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hanehalki-Bilisim-Teknolojileri-\(BT\)-Kullanım-Arastirmasi-2021-37437](https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hanehalki-Bilisim-Teknolojileri-(BT)-Kullanım-Arastirmasi-2021-37437) Erişim Tarihi: 18 Ağustos 2022.
- Venkatraman, S., Alazab, M., & Vinayakumar, R. (2019). A hybrid deep learning image-based analysis for effective malware detection. *Journal of Information Security and Applications*, 47, 377-389. doi:10.1016/j.jisa.2019.06.006
- Von Solms, R., & Van Niekerk, J. (2013). From information security to cyber security. *Computers & Security*, 38, 97-102. doi:10.1016/j.cose.2013.04.004
- Weamie, S. J. (2022). Cross-site scripting attacks and defensive techniques: A comprehensive survey. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 15(8), 126-148. doi:10.4236/ijcns.2022.158010
- Xuan, S., Liu, G., Li, Z., Zheng, L., Wang, S., & Jiang, C. (2018, March). *Random forest for credit card fraud detection*. 2018 IEEE 15th international conference on networking, sensing and control (ICNSC), Zhuhai, China. doi:10.1109/ICNSC.2018.8361343
- Xue, D., Li, J., Lv, T., Wu, W., & Wang, J. (2019). Malware classification using probability scoring and machine learning. *IEEE Access*, 7, 91641-91656. doi:10.1109/ACCESS.2019.2927552
- Yalçınkaya, M. A., & Küçüksille, E. (2021). Web uygulama sızma testlerinde kapsam genişletme işlemi için metodoloji geliştirilmesi ve uygulanması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 16-27. doi:10.19113/sdufenbed.661867
- Yiğit, M. F., & Seferoğlu, S. S. (2019). Öğrencilerin siber güvenlik davranışlarının beş faktör kişilik özellikleri ve çeşitli diğer değişkenlere göre incelenmesi. *Mersin Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 15(1), 186-215. doi:10.17860/mersinefd.437610
- Zhou, J., Qiu, Y., Khandelwal, M., Zhu, S., & Zhang, X. (2021). Developing a hybrid model of Jaya algorithm-based extreme gradient boosting machine to estimate blast-induced ground vibrations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 145, 104856. doi:10.1016/j.ijrmms.2021.104856



Research Article

**Classification of Emotion with Audio Analysis**

**Coşkucan BÜYÜKYILDIZ<sup>\*1</sup>, İsmail SARITAŞ<sup>2</sup>, Ali YAŞAR<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Selçuk University, Faculty of Technology, Institute of Science, 42250, Konya, Türkiye

<sup>2</sup>Selçuk University, Faculty of Technology, Electrical and Electronic Engineering, 42250, Konya, Türkiye

<sup>3</sup>Selçuk University, Faculty of Technology, Mechatronic Engineering Department, 42250, Konya, Türkiye

Coşkucan BÜYÜKYILDIZ, ORCID No: 0000-0002-8190-5914, İsmail SARITAŞ,

ORCID No: 0000-0002-5743-4593, Ali YAŞAR, ORCID No: 0000-0001-9012-7950

\*Corresponding author e-mail: coskucan94@hotmail.com

**Article Info**

Received: 16.12.2022

Accepted: 20.03.2023

Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1219879

**Keywords**

Audio features,  
Classification,  
Emotion identifier,  
Machine learning database,  
Support vector machine

**Abstract:** Classification is an important technique used to distinguish data samples. The aim of this study is to classify according to emotions by extracting audio features. Two male and two female individuals expressed four different emotions as "fun", "angry", "neutral" and "sleepy" in the voice data. We used to "MFCC" as a Cepstral feature, "Centroid, Flatness, Skewness, Crest, Flux, Slope, Decrease, Kurtosis, Spread, Entropy, roll off point" as Spectral Feature, "Pitch, Harmonic ratio" as Periodicity Features in the sound features. After, we applied to the data that all the classification algorithms located in the classification learner toolbox in Matlab and we tried to classify the emotion with the algorithm that provides the highest accuracy. Each data in the classification study has twenty-six features inputs and one labeled output value. According to the results, support vector machine algorithm provided the highest accuracy performance. Considering the performances obtained, this study reveals that it is possible to distinguish and classify sounds using sentimental data and sound feature parameters.

**Ses Analiziyle Duyguların Sınıflandırılması**

**Makale Bilgileri**

Geliş: 16.12.2022

Kabul: 20.03.2023

Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1219879

**Anahtar Kelimeler**

Destek vektör makinesi,  
Duygu tanımlama,  
Makine öğrenmesi  
veritabanı,  
Ses öznitelikleri,  
Sınıflandırma

**Öz:** Sınıflandırma, veri örneklerini ayırt edebilmek için kullanılan önemli bir tekniktir. Bu çalışmada öz nitelikler çıkartılarak, duygulara göre sesin sınıflandırılması amaçlanmıştır. Neşeli, sinirli, nötr ve uyuklu olmak üzere dört farklı duyguda konuşan iki erkek ve iki kadın bireyden alınan ses verileri kullanılmıştır. Sesin özniteliklerinde; Kepstral özellik olarak "Mel-Frekansı Kepstral Katsayıları", Spektral Özellik olarak "Ağırlık Merkezi, Pürüzsüzlük, Çarpıklık, Tepe, Akış, Eğim, Azalma, Basıklık, Yayılma, Entropi, Yuvarlanma noktası", Periyodisite Özelliği olarak "Ses perdesi, Harmonik oran" kullandık. Daha sonra, Matlab'da bulunan "sınıflandırma öğrenici" araç kutusunda yer alan tüm sınıflandırma algoritmalarını veriye uyguladık ve en yüksek doğruluğu sağlayan algoritmayla duyguyu tahmin etmeye çalıştık. Sınıflandırma çalışmasında yer alan her bir veri, yirmi altı öz nitelik girdisi ve bir etiketli çıktı değerine sahiptir. Performans sonuçlarına göre, destek vektör makine algoritması en yüksek doğruluk değerini sağlamıştır. Elde edilen performans çıktıları göz önüne alındığında, bu çalışma, duyuşal veriler ve ses öznitelikleri kullanılarak sesleri ayırt etmenin ve sınıflandırmanın mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

## 1. Introduction

Speech is the most effective form of communication today. The tone of voice used during speech often gives clues about emotions and people act according to these feelings. Therefore, one of the ways to understand the other person correctly is to do an emotion analysis (Koolagudi et al., 2009). In order to do an emotional analysis, first of all, it is necessary to make a voice or speech analysis. With voice analysis, emotional changes in voice can be detected, and a data set can be created. Thus, voice or speech analysis is vital to improve communication and future interaction.

Emotion analysis models obtained by processing voice data are used to automate the business processes of companies and extract meaningful information. For this reason, we can determine the attitude of individuals or a particular group about the subject of the study. However, a large number of data to obtain positive or negative opinions makes it difficult to analyze. Therefore, classification studies using data mining and machine learning for emotion analysis have become one of the critical topics studied (Kaynar et al., 2016). Thanks to the classification studies created in this way, it is possible to reduce the possibility of making mistakes by minimizing workforce and obtaining more apparent results.

Machine learning is the development of automated techniques to learn how to make super predictions based on previous observations. In the literature, machine learning is defined under four headings; supervised, unsupervised, semi-supervised, and reinforcement learning.

Table 1. Instances with known labels (Kotsiantis, 2007)

Case	Feature 1	Feature 2	...	Feature n	Class
1	xxx	x	3501	xx	good
2	xxx	x	3899	xx	good
3	xxx	x	3810	xx	bad
...					...

Each sample in the dataset used in machine learning algorithms can be represented using many different data features. Features can be continuous, categorical, or binary. The learning is called supervised if the data samples are given with known labels. Examples of supervised learning are shown in Table 1 (Kotsiantis, 2007).

Classification is performed to determine the group to which the data types in a dataset belong. Thus, it provides an effective solution for parsing data. To distinguish the groups, the relevant data is labeled, and the model created with the selected algorithm learns this data during the training. Studies for classification can be created using machine learning algorithms such as Random Forest, Naive Bayes, K-Nearest Neighbors, Decision Tree, and Support Vector Machines. The data to be trained in the model are pre-labeled.

For this reason, classification studies are included in the subject of supervised learning in the literature. The model learned from the training data to determine the category of the input data is called a classifier. The classifier can be implemented as a binary classifier or a multi-class classifier. The input data in the binary classifier is divided into one of two categories at the output. Input data in a multi-class classifier can be determined as one of more than two output categories (Rebala et al., 2019).

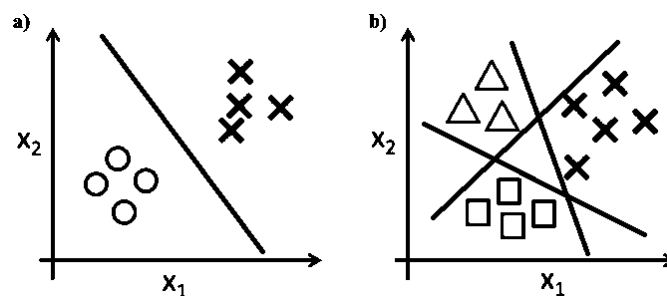


Figure 1. a) Binary classification b) Multi-class classification.

Features can be extracted from raw data such as audio, picture, and video used in machine learning. A model can be trained with machine learning algorithms using these features, and desired outputs can be obtained. In order to increase the performance and accuracy of the classification study to be carried out, it is crucial to extract the correct number of features and to ensure that these features are decisive (Lech et al., 2020). In order to analyze the sounds with machine learning, it is necessary to create a data pool by taking sound samples of many different emotions.

In this paper, we made a classification study by using supervised learning. It is a multi-class classifier because we use more than one label in the classification. Additionally, the audio dataset, which is publicly available in OpenSLR was obtained from (<https://coe.northeastern.edu/Research/ACLab/Speech%20Data/>). In order to analyze the sounds, 26 sound features were extracted, and a classification study was conducted by comparing machine learning algorithms with each other.

We have extensively trained and evaluated classification algorithms. We performed a detailed analysis on performance metrics together with methods such as Confusion Matrix and ROC curve. Also, we used different features such as spectral and periodicity with MFCC in this study. As a result of these comprehensive analyzes and the use of features, we have demonstrated the success of the Cubic SVM algorithm. In looking the literature, we see that there are many different studies on the classification of emotions with sound analysis. These studies have shown the superiority of SVMs in classification by using different methods. In this context, we presented information about the different studies in below.

Jain et al. (2018) aimed to classify due to gender by using prosodic and spectral features of sound for the Hindi language. Mel-frequency Cepstrum Coefficients (MFCC) and Linear Prediction Cepstral Coefficient (LPCC) used. The study carried out with the Cubic SVM classification algorithm. According to the results, 95% accuracy rate for women and 98.75% for men was obtained.

Chatterjee et al. (2018) were used two different techniques to classify Angry, Happy or Neutral emotions. First of all, maximum cross correlation was calculated between the voice data for labeling the data to be used. In the second technique, Energy, Volume, MFCC, Zero Crossing Rate, Formants and Spectral Centroid are used as Sound features. Then, these features were used in the Cubic SVM classification algorithm. According to the results, 91.3% accuracy rate obtained.

Tuncer et al. (2021) is presented a sound classification system using twine shufpat, INCA, and TQWT techniques. Using this system, accuracy values of 87.43%, 90.09%, 84.79%, and 79.08% were obtained for RAVDESS Speech, Berlin Emo-DB, SAVEE, and EMOVO databases, respectively. In addition, another classification study was carried out by mixing these databases. In this classification study, which includes nine different emotions, an accuracy value of 80.05% was obtained. Cubic SVM provided the best classification performance in the developed system.

Mohamad Nezami et al. (2019) was used Sharif Emotional Speech Database (ShEMO) for Persian language. For the emotions of Anger, fear, happiness, sadness, neutral and surprise, a classification study was carried out with samples taken from 87 native Persian speakers. According to the results, SVM's achieves the best results for both gender-independent (58.2%) and gender-dependent models (female=59.4%, male=57.6%).

Milton et al. (2013) was used a 3-stage SVM classifier for classification. MFCC features were extracted from 535 different audio data. Linear and RBF kernels were used as hierarchical SVMs with RBF sigma equal to 1. The training and testing process of the data was carried out in the form of cross-evaluation 10 times. According to the performance results, the accuracy rate is 68%.

Aouani & Ayed (2018) were carried out two different studies, namely sound feature extraction and classification. First of all, 39 and 65 different MFCC coefficient features are extracted. Secondly, the SVM algorithm was used as a classifier. According to the results performed in the SAVEE audio database, the DSVM method using 39 MFCC coefficients showed better results than standard SVMs with a classification rate of 69.84% and 68.25%. In addition, the auto-encoder method performed better with a classification rate of 73.01%.

Sonawane et al. (2017) support vector machines are used as the classifier algorithm. In addition, MFCC audio features are used. Classification was carried out on happy, angry, sad, disgusted, surprised and neutral emotions. The results revealed that nonlinear kernel SVM achieves higher accuracy than linear SVM.

## 2. Material and Methods

In this section, the materials and methods used in the study are presented and examined under three sub-titles. Figure 2 shows the processes of the work performed.

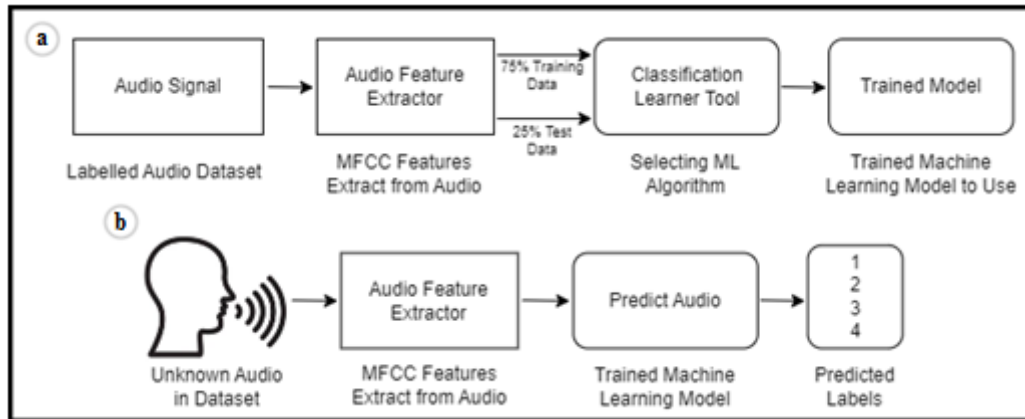


Figure 2. a) Train process of machine learning model b) Predict process of unknown audio data.

### 2.1. Dataset

Audio recordings in English and French are available in the Dataset. In these recordings, five different senses, such as "Amused, Neutral, Sleepy, Disgusted and Angry" were used. Two female and two male English and one male French native speaker were asked to read the sentences while expressing one of these feelings. English and French sentences are sourced from an open-source database. English data were recorded in two insulated rooms on the Northeastern University campus. All data was recorded at 44.1k and down sampled at 16k and recorded in 16-bit PCM WAV format (Adigwe et al., 2018).

In this study, only the English language was used together with the emotional expressions "Amused, Neutral, Sleepy and Angry" in the related data set. For each emotion used, 100 voice recordings were evaluated. Samples of 3 seconds were used for each sound recording. The count of audio records belonging to Neutral, Amused, Angry and Sleepy emotions is shown in Table 2. In addition, the names and gender information of the speakers are also presented in Table 2 below.

Table 2. Used dataset content

Speaker	Gender	Neutral	Amused	Angry	Sleepy
Jennie	Female	417	222	523	466
Bea	Female	373	309	317	520
Sam	Male	493	501	468	495
Josh	Male	302	298	-	263

### 2.2. Feature extraction

When feature extraction is performed, the original data in the dataset is preserved. In addition, numerical values that can be processed are obtained from the raw data. A model trained with feature extraction gives better results than a model trained with raw data. The features of the sounds were obtained with the "audio feature extractor" function in Matlab. The features used in the study are explained below.

Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs): Mel-frequency cepstrum (MFC) can be described as the short-term power spectrum of a sound in signal processing. Also, this cepstrum uses a linear cosine transform of a log power spectrum on a nonlinear Mel-frequency scale. Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs) make up the MFC (Vyas & Kumari, 2013). While obtaining the cepstrum coefficients used as the feature vector, MFCC is generally used in speaker recognition applications. Because MFCC imitates the frequency selectivity of the human ear, it achieves



discriminating values for a good speaker. In addition, the MFCC coefficients are much less affected by the changes and the sound wave structure (Eskidere & Ertaş, 2009).

**Spectral Centroid:** Spectral centroid defines the location of the center of mass of the spectrum. This term is associated with the brightness of the sound (Grey & Gordon, 1978).

**Spectral Flatness:** Spectral flatness or tonality coefficient is also known as Wiener entropy. It is used to measure how pure a tone the sound is. It can be measured from the decibel of sound (Dubnov, 2004).

**Spectral Skewness:** The spectral skewness measures the symmetry of the spectrum around its centroid. The skewness can take positive, zero, negative, or undefined values (Lerch, 2012).

**Spectral Kurtosis:** A Spectral kurtosis is a statistical tool that determines the presence of a series of transients in the signal and their position in the frequency domain (Antoni, 2006).

**Spectral Crest:** Spectral crest is the ratio of the peak values in the audio signal to the arithmetic mean. It shows the peak in the sound spectrum. The higher the peak value, the higher the tone. However, the lower the peak value, the higher the audio noise (Peeters et al., 2011).

**Spectral Flux:** Spectral flux is the rate of change in the sound's power spectrum. The difference between the power spectrum of the frame in the sound and the previous frame calculates it. Each difference is squared, and the result is the sum of the squares (Giannoulis et al., 2013).

**Spectral Slope:** In digital signal processing, it measures the rate of change of the spectrum of an acoustic sound, which decreases towards higher frequencies, calculated using linear regression and the central wavelet of the signal (Peeters, 2004).

**Spectral Decrease:** Spectral decrease refers to the amount of reduction in the spectrum. It shows the lower frequency slopes of the signal. It is an important criterion for instrument recognition (Peeters et al., 2011).

**Spectral Spread:** The spectral spread can be expressed as the distribution around the weighted center of the spectrum. The signals concentrated in this center are the points where the spectral spread is low (Giannakopoulos & Pikrakis, 2014).

**Spectral Entropy:** The spectral entropy can be expressed as the spectral power distribution of the signal obtained using the normalized Fourier transform. This entropy is based on Shannon's entropy in information theory. It is a widely used measurement in speech recognition applications (Misra et al., 2004).

**Spectral Roll-off:** The spectral roll-off point calculates the rolling frequency of a spectrum. The frame at this point contains 85% of the spectrum power at low frequencies. It is used to distinguish between loud and silent speech and music (Mitrović et al., 2010).

**Pitch:** Indicates that the perceived sound is high and low. High-pitch values are associated with thin sounds, while low-pitch values are associated with deep sounds.

**Harmonic Ratio:** The harmonic ratio is obtained by dividing the frequency power by the total power in an audio signal frame (Mitrović et al., 2010).

### 2.3. Classification algorithms

This study used all classification algorithms in the classification learner in the Matlab tool for comparison purposes. 75% of the dataset was set as training data. 25% was used as test data. The four different emotions in the dataset are labeled as follows. This labeled the data is added to data table as output. Labeled values and classes are shown following in Table 3.

Table 3. Labeled features

Label	1	2	3	4
Class	Amused	Angry	Neutral	Sleepy

The classification algorithms used in this study are as follows; Cubic SVM, Bagged Trees, Medium Gaussian SVM, Wide Neural Network, Fine Gaussian SVM, Quadratic SVM, Medium Neural Network, Weighted KNN, Cosine KNN, Medium KNN, Fine KNN, Trilayered Neural Network, Cubic KNN, Bilayered Neural Network, Narrow Neural Network, Coarse KNN, Coarse Gaussian SVM, Linear SVM, Subspace Discriminant, Fine Tree, Subspace KNN, Quadratic



Discriminant, Boosted Trees, Medium Tree, RUSBoosted Trees, Kernel Naive Bayes, Coarse Tree, Gaussian Naive Bayes.

According to the results, the best classification outputs were obtained from the support vector machine algorithms. For this reason, only support vector machines are examined in this section. Support Vector Machine is a supervised learning method generally used in classification problems. One of the benefits of SVM is that it can build machine-learning models with intermittent data and few data samples. SVMs are binary linear classifiers and parametric learners. Parametric approaches use parameters to train the model. Each data item in the used dataset can have more than one feature, and each feature has a place in the coordinate plane. Therefore, It is drawn as a point in a multidimensional space with as many features as it has (Kishore et al., 2022). These algorithms create a hyperplane boundary to separate the data points into two categories. At least one hyperplane is required to specify data boundaries. Data samples that this hyperplane can separate are called linearly separable. SVM algorithms can parse nonlinear data samples using kernel functions (Rebala et al., 2019).

**Cubic SVM:** Support vector machine operations in multidimensional space can take a long time. For this reason, we can perform operations in a shorter time by using kernel functions. Cubic SVM is realized using a Polynomial kernel function. These functions are a non-stationary kernel. The polynomial kernel is generally suitable for problems where all the training data are normalized (Metlek & Kayaalp, 2020). 3<sup>rd</sup>-degree polynomials are expressed as cubic polynomials. Therefore, in the equation below, the cubic kernel function is 3rd degree. For an SVM type classifier, if the kernel function used is cubic, it is expressed as in Equation (1) (Jain et al., 2018). Here, the product of the vectors  $x_i$  and  $x_j$  is related to the similarity between them, that is, the angle between them.

$$\kappa(x_i, x_j) = (x_i^T, x_j)^3 \quad (1)$$

### 3. Results

According to the results, the Cubic SVM algorithm provided the best prediction response with 84.2%. Looking at the top five best scores in Figure 3, it is seen that SVM algorithms are in the majority. Looking at the last five classification algorithms in Figure 3, it is seen that the lowest score belongs to the Tree and Naive Bayes algorithm.

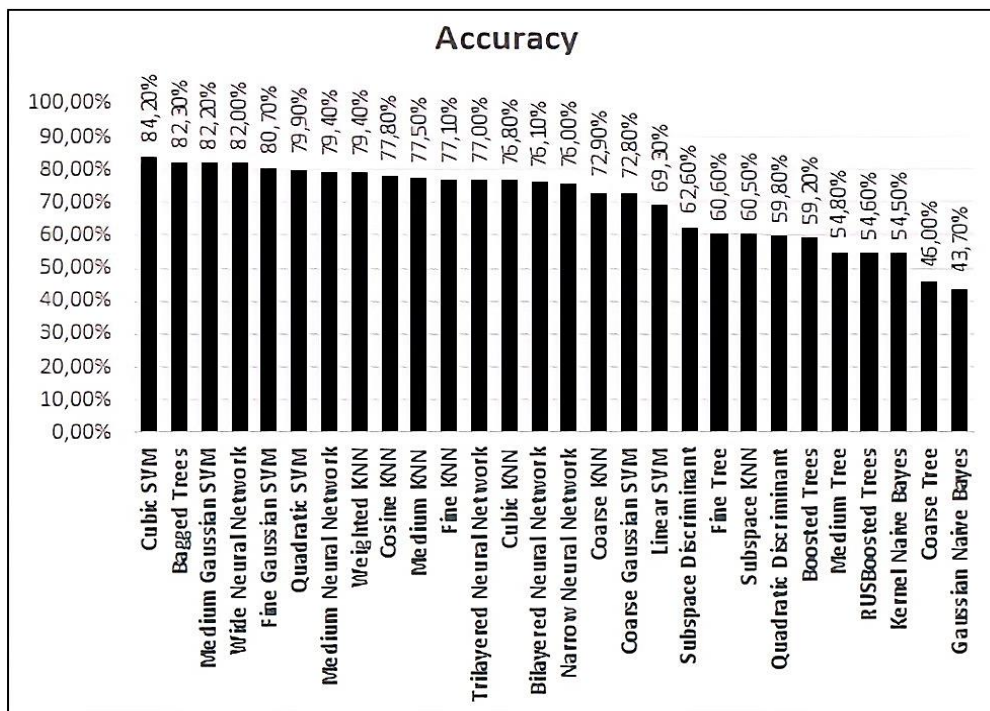


Figure 3. Accuracy table of classification algorithms for emotion analysis.

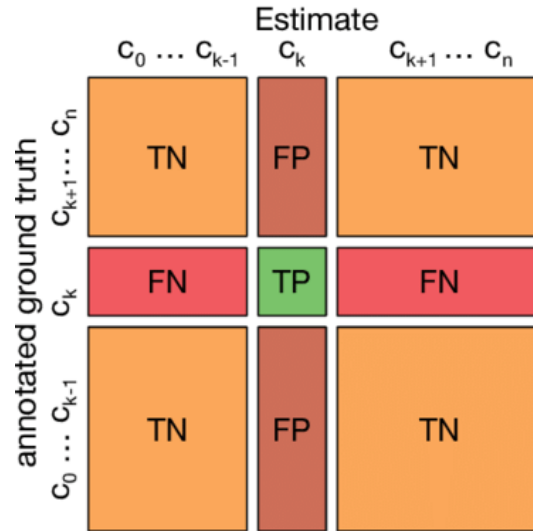


Figure 4. Confusion matrix for multi-class classification (Krüger, 2016).

In order to better understand a classification problem and measure its accuracy, the results obtained should be interpreted and evaluated after the relevant model is trained. In this case, the confusion matrix can be used as a widely used tool in machine learning, and we can evaluate the outputs visually. The columns of the Confusion Matrix show the results of the prediction classes, and the rows show the results of the actual class. According to this matrix, all possible states of the classification problem are shown. In addition, it also displays the total number of misclassified data for each class included in the matrix. True Positive, True Negative, False Positive, and False Negative metrics can be calculated using the Confusion Matrix (Yasar, 2022). An example of a multiclass confusion matrix with  $n$  classes is shown in Figure 4. The data prediction points in the confusion matrix are expressed in Equation (2) (Krüger, 2016).

$$C = (c_{ij}) \quad (2)$$

Where  $c_{ij}$  is the number of time-steps where the class was actually  $i$  and class  $j$  has been estimated. When considering the class  $k$  ( $0 \leq k \leq n$ ), the confusion matrix provides four types of classification results due to one classification target  $k$  (Tharwat, 2020):

True Positive (TP) is the number correctly determined in the classes true and predicted. The equation is expressed in the following Equation (3).

$$C = (c_{kk}) \quad (3)$$

False Negative (FN) is the number of points where the true class is true and the predicted class is false. The equation is expressed in the following Equation (4).

$$\sum_{i \in N \setminus \{k\}} c_{ki} \quad (4)$$

False positive (FP) is the number of points correctly predicted in the predicted class and incorrectly predicted in the true class. The equation is expressed in the following Equation (5).

$$\sum_{i \in N \setminus \{k\}} c_{ik} \quad (5)$$

True Negative (TN) is the number of points where the true and predicted classes are false. The equation is expressed in the following Equation (6).

$$\sum_{ij \in N \setminus \{k\}} C_{ij} \quad (6)$$

In this study, the dimension of a Confusion Matrix is  $4 \times 4$ . The multi-class confusion matrix results realized with the Cubic SVM algorithm are shown in Table 4. Classification parameters were calculated separately for each classifier.

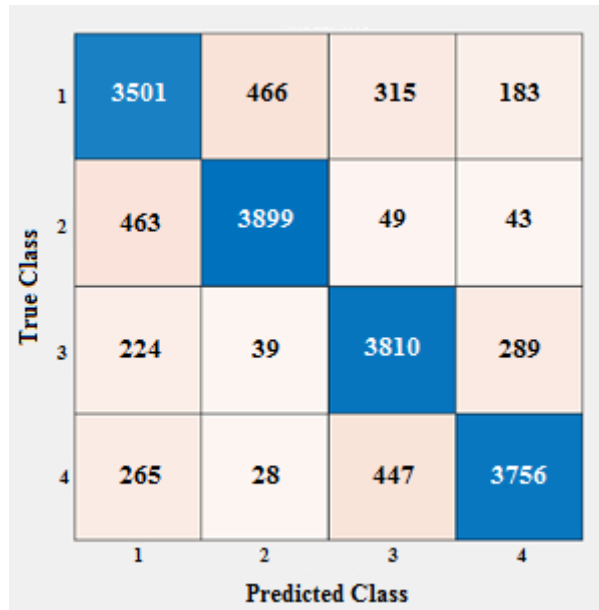


Figure 5. Confusion matrix of validation data for cubic SVM algorithm.

Table 4. Analysis of the confusion matrix

Class	False Positive	False Negative	True Positive	True Negative
1	952	964	3 501	12 360
2	533	555	3 899	12 790
3	811	552	3 810	12 604
4	515	740	3 756	12 766

3 501 of the "amused" class was correctly classified and this corresponds to 19.7% of all 17 777 audio features in the data. 3 899 of the "angry" class are correctly classified and this corresponds to 21.9% of all data. 3 810 of the "neutral" class are correctly classified and this corresponds to 21.4% of all data. 3 756 of the "sleepy" class are correctly classified and this corresponds to 21.2% of all data. 84.2% of the predictions are correct, and 15.8% are wrong. According to these results, the most used performance metrics are presented below.

The Accuracy (Acc) performance metric is one of the frequently used criteria in classification problems. It is expressed as the ratio of correctly classified samples to the total number (Vyas & Kumari, 2013). The equation is expressed in the following Equation (7).

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (7)$$

where P and N indicate the number of positive and negative samples, respectively.

Error Rate (Err) is the inverse of the accuracy metric. It is the ratio of the values that incorrect predictions to the total number (Tharwat, 2020). The equation is expressed in the following Equation (8).

$$\text{Err} = 1 - \text{Acc} = \frac{\text{FP} + \text{FN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (8)$$

Precision is the ratio of the true positive values to the sum of the predicted positive classes. This metric is more insensitive to unbalanced data. Therefore, it can be preferred instead of the accuracy metric for this data type. This value is high in a classification problem with good results. The equation is expressed in the following Equation (9).

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (9)$$

Sensitivity is also referred to as True Positive Rate or Recall. It is a measure of positive examples labeled as positive by a classifier. It should be higher. The equation is expressed in the following Equation (10).

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (10)$$

False positive rate (FPR) is a ratio of the total number of incorrectly classified positive examples to the total number of ground truth negatives. The equation is expressed in the following Equation (11).

$$\text{FPR} = \frac{\text{FP}}{\text{TN} + \text{FP}} \quad (11)$$

Using the metrics obtained in the confusion matrix analysis, Table 5 was created with the above measurement methods. The values in the table were calculated separately according to the classes.

Table 5. Performance metrics that used for classification

Class	Accuracy	Error Rate	Precision	FPR	Sensitivity
1	89.2%	10.8%	78.6%	7.15%	78.4%
2	93.8%	6.2%	78.9%	4.00%	87.5%
3	92.3%	7.7%	75.7%	6.04%	87.3%
4	92.9%	7.1%	81.9%	3.87%	83.5%

The ROC curve can be created with the performance metrics in the table above. This curve is created by comparing the true positive rate vertically and the false positive rate horizontally. Although ROC is a probability curve, it is one of the commonly used metrics to evaluate the performance of machine learning algorithms in the presence of inconsistent datasets. The area under the ROC curve is briefly expressed as AUC. The AUC shows how well the model can distinguish classes. The higher the AUC value, the easier it is to distinguish classes (Yasar et al., 2018).

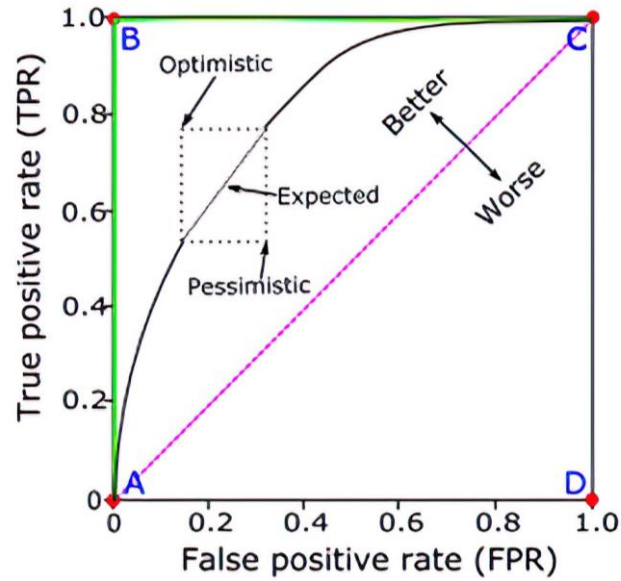


Figure 6. Characteristic and measuring points of the ROC curve (Kishore et al., 2022).

Figure 6 shows the possible behavior of the ROC curve. Four important coordinate points, A, B, C, and D, show the ROC curve's performance. Here, at point B (0,1), the best results of the curve are obtained. Therefore, the green curve shown in Figure 6 passes through point B. The area under the green curve (AUC) is equal to one (Tharwat, 2020).

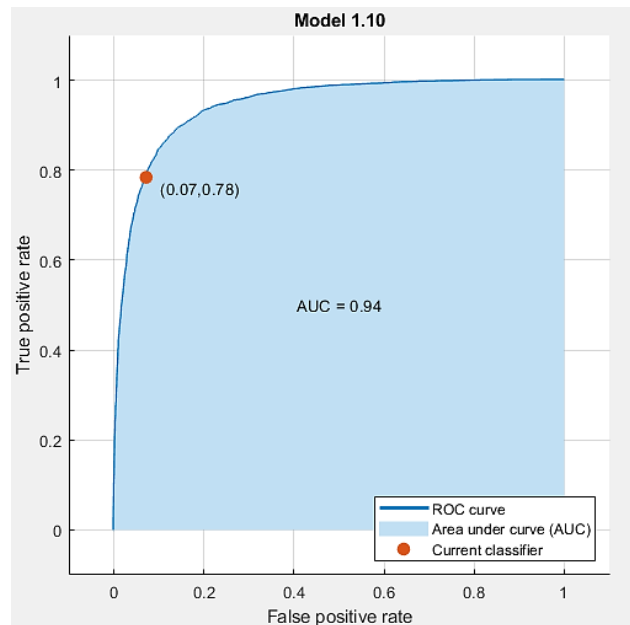


Figure 7. ROC curve for class 1 (Amused).

As shown in Figure 7, the AUC value for class 1 (Amused) in validation data was calculated as  $AUC = 0.94$ . According to the result, the classifier prediction of the Cubic SVM algorithm for class 1 is high.

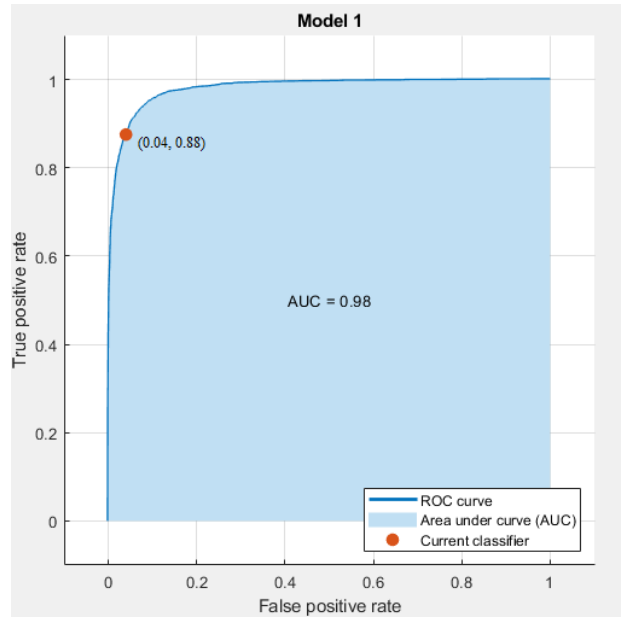


Figure 8. ROC curve for class 2 (Angry).

As shown in Figure 8, the AUC value for class 2 (Angry) in validation data was calculated as  $AUC = 0.98$ . According to the result, the classifier prediction of the Cubic SVM algorithm for class 2 is high.

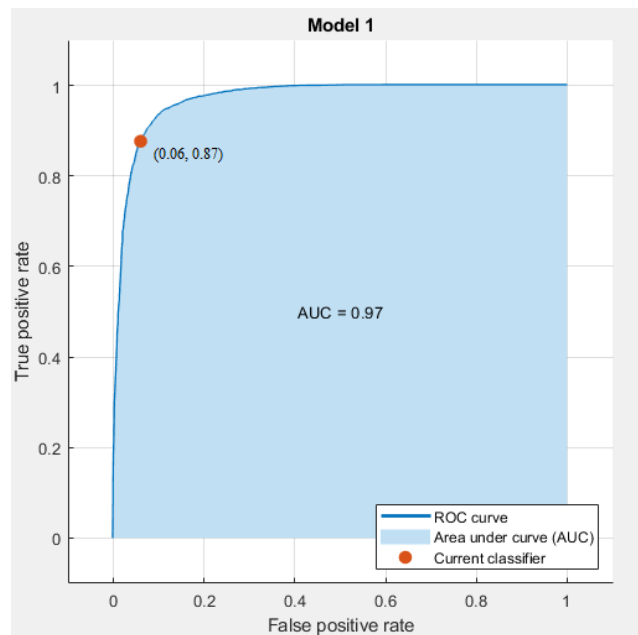


Figure 9. ROC curve for class 3 (Neutral).

As shown in Figure 9, the AUC value for class 3 (Neutral) in validation data was calculated as  $AUC = 0.97$ . According to the result, the classifier prediction of the Cubic SVM algorithm for class 3 is high.



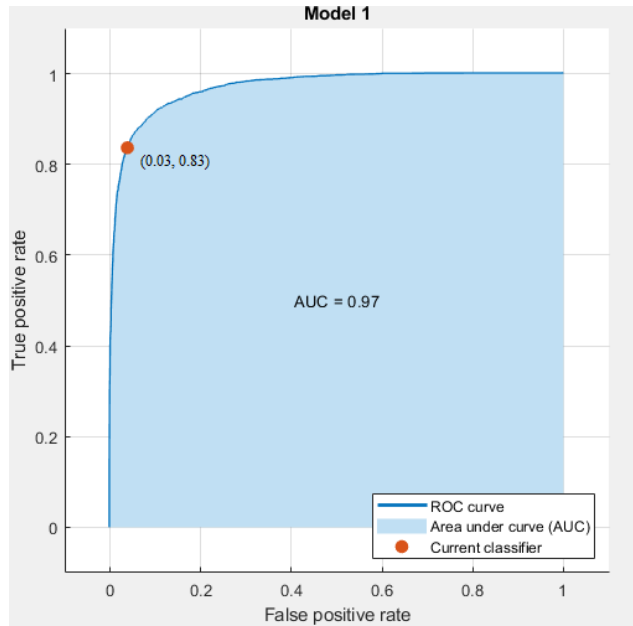


Figure 10. ROC curve for class 4 (Sleepy).

As shown in Figure 10, the AUC value for class 4 (Sleepy) in validation data was calculated as  $AUC = 0.97$ . According to the result, the classifier prediction of the Cubic SVM algorithm for class 4 is high.

Figure 11 shows the Confusion Matrix results for the voice data containing sleepy emotional expressions, which is not included in the data set. For test data, 60 different features were extracted from the 3-second audio data, and these features were classified using the previously trained cubic SVM algorithm. According to the results obtained from the model, 13 features were classified as 1st class, 17 as 3rd class, and 30 as 4th class. Looking at the results, the most data is in the 4th class. Therefore, it can be said that the estimated test data belongs to the sleepy class.

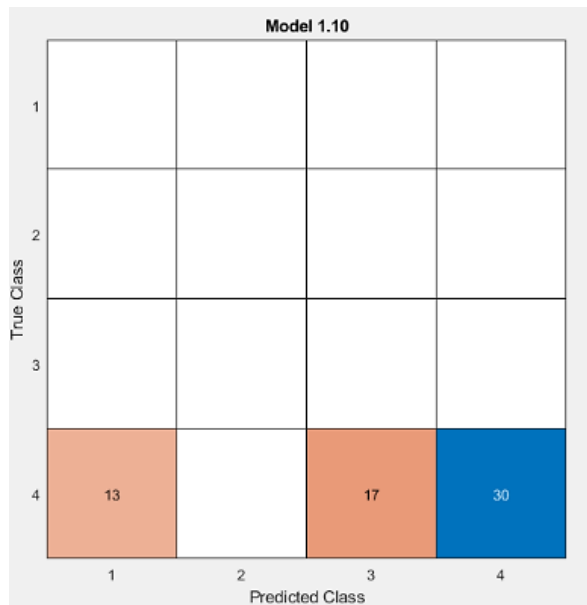


Figure 11. Confusion matrix of test data for sleepy emotion.

The Confusion Matrix in Figure 12 shows the results of audio data that include amused emotional expressions not included in the dataset. In this example, 60 different features are extracted

from 3-second audio data. The outputs obtained from the model are classified as 27 features 1st class, 15 features 2nd class, 6 features 3rd class, and 12 features 4th class. As a result, the most of the data are in the 1st class. Therefore, it can be said that the predicted test data belong to the amused class. The Cubic SVM model was seen to analyze the "amused" input audio data accurately.

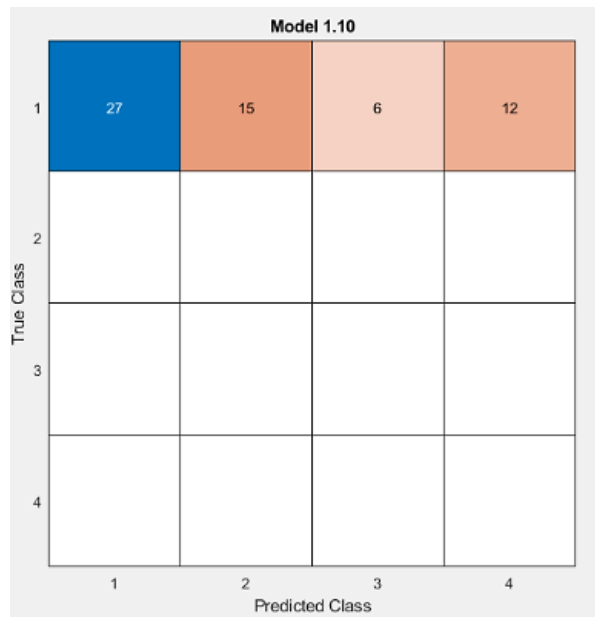


Figure 12. Confusion matrix of test data for amused emotion.

#### 4. Conclusion

This article discusses a classification study using supervised learning to determine emotions in audio recordings. The study uses the publicly available OpenSLR audio dataset and extracts 26 sound features to be used in the machine learning algorithms. The article explains the feature extraction process and the different features used, such as Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs), Spectral Centroid, Spectral Flatness, Spectral Skewness, Spectral Kurtosis, Spectral Crest, Spectral Flux, Spectral Slope, Spectral Decrease, Spectral Spread, Spectral Entropy, Pitch, and Harmonic Ratio. The study uses all classification algorithms in the classification learner in Matlab.

Unlike existing studies, we used to various classification algorithms in this study and we worked with spectral and periodic features as well as cepstral coefficients. After this comprehensive training and evaluation process, we obtained accuracy values for each classification algorithm. According to results, the Cubic SVM algorithm provided the best response with 84.2% accuracy in multi-featured and multidimensional chaotic audio data. Then, the results performed with the test data on the Trained Cubic SVM model were examined, and the accuracy of the trained model was checked.

When we look at the literature in voice sentiment analysis studies, the success of SVM algorithms is clearly seen. In this study, Cubic SVM algorithm is presented as the best sound emotion classifier by comparing to other classification algorithms and by using extensive sound features. For this reason, Cubic SVM algorithm is recommended because of its high accuracy value and high performance metric outputs in order to classify emotions in English language conversations.

#### 5. Acknowledgements

This article was presented orally at the 10th International Conference on Advanced Technologies (ICAT'22) and selected to be published by ICAT'22 Editor Committee. Paper ID: 0274, Paper Name: Classification of Emotions with Audio Analysis. An expanded version of the article has been uploaded to this journal.

## References

- Adigwe, A., Tits, N., Haddad, K. E., Ostadabbas, S., & Dutoit, T. (2018). The emotional voices database: Towards controlling the emotion dimension in voice generation systems. *arXiv preprint arXiv:1806.09514*. doi:10.48550/arXiv.1806.09514
- Antoni, J. (2006). The spectral kurtosis: A useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(2), 282-307. doi:10.1016/j.ymssp.2004.09.001
- Aouani, H., & Ayed, Y. B. (2018, March). *Emotion recognition in speech using MFCC with SVM, DSVM and auto-encoder*. 2018 4th International conference on advanced technologies for signal and image processing (ATSIP), Sousse, Tunisia. doi:10.1109/ATSIP.2018.8364518
- Chatterjee, J., Mukesh, V., Hsu, H.-H., Vyas, G., & Liu, Z. (2018, August). *Speech emotion recognition using cross-correlation and acoustic features*. 2018 IEEE 16th Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 16th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 4th Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress (DASC/ PiCom/ DataCom/ CyberSciTech), Athens, Greece. doi:10.1109/DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTec.2018.00050
- Dubnov, S. (2004). Generalization of spectral flatness measure for non-gaussian linear processes. *IEEE Signal Processing Letters*, 11(8), 698-701. doi:10.1109/LSP.2004.831663
- Eskidere, Ö., & Ertaş, F. (2009). Mel frekansı kepstrum katsayılarındaki değişimlerin konuşmacı tanımaya etkisi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 14(2), 93-110.
- Giannakopoulos, T. & Pikrakis, A. (2014). Introduction to audio analysis: A MATLAB® approach. Orlando, FL, USA: Academic Press Inc.
- Giannoulis, D., Massberg, M. & Reiss, J. D. (2013). Parameter automation in a dynamic range compressor. *Journal of the Audio Engineering Society*, 61(10), 716-726.
- Grey, J. M., & Gordon, J. W. (1978). Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(5), 1493-1500. doi:10.1121/1.381843
- Jain, U., Nathani, K., Ruban, N., Raj, A. N. J., Zhuang, Z., & Mahesh, V. G. V. (2018, October). *Cubic SVM classifier based feature extraction and emotion detection from speech signals*. 2018 International Conference on Sensor Networks and Signal Processing (SNSP), Xi'an, China. doi:10.1109/SNSP.2018.00081
- Kaynar, O., Görmez, Y., Yıldız, M., & Albayrak, A. (2016, September). *Makine öğrenmesi yöntemleri ile duygu analizi*. International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP'16), Malatya, Türkiye.
- Kishore, B., Yasar, A., Taspınar, Y. S., Kursun, R., Cinar, I., Shankar, V. G., ... & Ofori, I. (2022). Computer-aided multiclass classification of corn from corn images integrating deep feature extraction. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2062944. doi:10.1155/2022/2062944
- Koolagudi, S. G., Maity, S., Kumar, V. A., Chakrabarti, S., & Rao, K. S. (2009). IITKGP-SESC: Speech Database for Emotion Analysis. In S. Ranka et al. (Eds). *Contemporary Computing: Second International Conference* (pp. 485-492). Noida, India: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-03547-0\_46
- Kotsiantis, S. B. (2007). Supervised machine learning: A review of classification techniques. *Informatika (Slovenia)*, 31(3), 249-268.
- Krüger, F. (2016). *Activity, context, and plan recognition with computational causal behaviour models*. (PhD), University of Rostock, Institute of Communications Engineering, Rostock, Germany.
- Lech, M., Stolar, M., Best, C., & Bolia, R. (2020). Real-time speech emotion recognition using a pre-trained image classification network: Effects of bandwidth reduction and companding. *Frontiers in Computer Science*, 2, 14. doi:10.3389/fcomp.2020.00014
- Lerch, A. (2012). *An introduction to audio content analysis: Applications in signal processing and music informatics*. New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press.
- Metlek, S., & Kayaalp, K., 2020. *Makine Öğrenmesinde, Teoriden Örnek MATLAB Uygulamalarına Kadar Destek Vektör Makineleri*. Ankara, Türkiye: İksad Yayınevi.

- Milton, A., Roy, S. S., & Selvi, S. T. (2013). SVM scheme for speech emotion recognition using MFCC feature. *International Journal of Computer Applications*, 69(9), 34-39. doi:10.5120/11872-7667
- Misra, H., Ikbal, S., Bourslard, H., & Hermansky, H. (2004, May). *Spectral entropy based feature for robust ASR*. 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, QC, Canada. doi:10.1109/ICASSP.2004.1325955
- Mitrović, D., Zeppelzauer, M., & Breiteneder, C. (2010). Chapter 3- Features for content-based audio retrieval. In M. V. Zelkowitz (Ed.), *Advances in Computers*, Vol. 78 (pp. 71-150). Burlington, USA: Elsevier. doi:10.1016/S0065-2458(10)78003-7
- Mohamad Nezami, O., Jamshid Lou, P., & Karami, M. (2019). ShEMO: a large-scale validated database for Persian speech emotion detection. *Language Resources and Evaluation*, 53, 1-16. doi:10.1007/s10579-018-9427-x
- Peeters, G. (2004). A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. *CUIDADO Ist Project Report* (pp. 1-25). Paris, France: Icram.
- Peeters, G., Giordano, B. L., Susini, P., Misdariis, N., & McAdams, S. (2011). The timbre toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(5), 2902-2916. doi:10.1121/1.3642604
- Rebala, G., Ravi, A., & Churiwala, S. (2019). *An Introduction to Machine Learning*. Cham, Switzerland: Springer.
- Sonawane, A., Inamdar, M. U., & Bhangale, K. B. (2017, August). *Sound based human emotion recognition using MFCC & multiple SVM*. 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), Indore, India. doi:10.1109/ICOMICON.2017.8279046
- Tharwat, A. (2020). Classification assessment methods. *Applied Computing and Informatics*, 17(1), 168-192. doi:10.1016/j.aci.2018.08.003
- Tuncer, T., Dogan, S., & Acharya, U. R. (2021). Automated accurate speech emotion recognition system using twine shuffle pattern and iterative neighborhood component analysis techniques. *Knowledge-Based Systems*, 211, 106547. doi:10.1016/j.knosys.2020.106547
- Vyas, G., & Kumari, B. (2013). Speaker recognition system based on mfcc and dct. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(5), 167-169.
- Yasar, A., Saritas, I., & Korkmaz, H. (2018). Determination of intestinal mass by region growing method. *Preprints*, 2018, 2018050449. doi:10.20944/preprints201805.0449.v1
- Yasar, A. (2022). Benchmarking analysis of CNN models for bread wheat varieties. *European Food Research and Technology*, 249, 749-758. doi:10.1007/s00217-022-04172-y



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Van İli Evsel Atıksu Arıtma Tesislerindeki Atıksu Karakteristiğinin ve Çıkış Suyu Kalitesinin Değerlendirilmesi: Edremit ve Gevaş Örneği #

Yunus Emre OKUMUŞ<sup>1</sup>, Vahap YÖNTEN<sup>1\*2</sup>, Ayşe ÖZGÜVEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği ABD, 65080, Van, Türkiye

<sup>2</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye  
Yunus Emre OKUMUŞ, ORCID No: 0000-0003-0449-6755, Vahap YÖNTEN, ORCID No: 0000-0002-0954-0383, Ayşe ÖZGÜVEN, ORCID No: 0000-0003-1071-2813

\*Sorumlu yazar e-posta: vahapyonten@yyu.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 30.09.2022  
Kabul: 13.01.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1182302

#### Anahtar Kelimeler

Atıksu arıtma tesisi,  
Giderim verimi,  
Karakterizasyon,  
Van

**Öz:** Bu çalışmada, Van ilinde bulunan Edremit ve Gevaş Atıksu Arıtma Tesisleri atıksu karakteristiğinin mevsimsel olarak değişimi incelenmiştir. Bu amaçla atıksu karakterizasyonunu incelemek için arıtma tesislerinin giriş ve çıkışlarından 2021 yılı ocak ve temmuz aylarında numuneler alınmıştır ve bu numunelerde pH, alkalinite, sülfat, askıda katı madde, toplam katı madde, toplam uçucu katı madde, çözünmüş oksijen, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, kimyasal oksijen ihtiyacı, iletkenlik, sıcaklık, toplam azot, toplam fosfor ve yağ-gres gibi parametreler ölçülmüştür. Gevaş atıksu arıtma tesisinin kimyasal oksijen ihtiyacı için ortalama giderim verimi %83, Edremit atıksu arıtma tesisi için ise yaklaşık %80, Gevaş atıksu arıtma tesisinin biyokimyasal oksijen ihtiyacı için ortalama giderim verimi %92, Edremit atıksu arıtma tesisi için ise yaklaşık %86 olarak bulunmuştur. Askıda katı madde giderim verimi Gevaş atıksu arıtma tesisi için yağışlı ve kurak dönem için sırasıyla; %88, %98 iken Edremit atıksu arıtma tesisi için ise %90 ve %84 olmuştur. Her iki arıtma tesisinde arıtma işleminden sonra deşarj edilen atıksuyun birçok parametre için Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne uygun olduğu söylenebilir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların, diğer atıksu arıtma tesisleri için yol gösterici olacağı kanısındayız ve ayrıca standartlara uymayan parametrelere dikkat edilmesinin zaruri bir durum olduğu raporlanmıştır.

### Seasonal Evaluation of Wastewater Characteristics and Effluent Quality in Domestic Wastewater Treatment Plants in Van, Edremit Gevaş Example

#### Article Info

Received: 30.09.2022  
Accepted: 13.01.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1182302

#### Keywords

Characterization,  
Removal efficiency,  
Van,  
Wastewater treatment plant

**Abstract:** In this study, seasonal variation of wastewater characteristics of Edremit and Gevaş Wastewater Treatment Plants in Van was investigated. For this purpose, samples were collected from inlet and outlet of the treatment plants in January and July 2021 to examine the wastewater characterization and in these samples pH, alkalinity, sulphate, suspended solids, total solids, total volatile solids, dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, conductivity, temperature, total nitrogen, total phosphorus and oil and grease were analyzed. Gevaş Wastewater Treatment Plants average removal efficiency for chemical oxygen demand was 83%, for Edremit Wastewater Treatment Plants about 80%, Gevaş Wastewater Treatment Plants average removal efficiency for biochemical oxygen demand was 92%, and for Edremit Wastewater Treatment Plants about 86%. suspended solids removal efficiency for Gevaş Wastewater Treatment Plants for rainy and dry periods, respectively; 88%, 98%, and for Edremit Wastewater Treatment Plants 90%, 84. It can be said that the wastewater discharged after the treatment process in both treatment plants complies with the Water Pollution Control Regulation for many

parameters. We believe that the results obtained in this study will be a guide for other wastewater treatment plants, and it has also been reported that it is essential to pay attention to the parameters that do not comply with the standards.

# Bu makale, Yunus Emre OKUMUŞ' un yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

## 1. Giriş

Atıksu, günlük hayat akışında; evsel faaliyetlerde, sanayi veya üretim tesislerinde kullanıldıktan sonra özelliğini kaybetmiş sulara denilmektedir (Kavak, 2016). Ülkelerdeki kentleşme, hızlı nüfus artışı ve ekonomik gelişme sonucunda insan faaliyetlerinden kaynaklanan atıksu miktarı giderek artmaktadır (Momeni ve ark., 2019). Atıksuyun miktarı ve karakterizasyonu birçok faktör tarafından belirlenir. Bölgenin iklim durumu, yaşam standardı ve kültürü atıksu karakterizasyonunu önemli derecede etkiler. Kısacası atıksuların tipik özellikleri yalnızca bölgeden bölgeye değil mevsimden mevsime göre de değişkenlik göstermektedir (Tekeli & Arslan, 2008). Evsel atıksular genel itibarıyla organik madde, metallere, diğer inorganik maddeler ve askıdaki katı maddelerden (AKM) oluşmaktadır. Ayrıca evsel atıksular patojen birçok mikroorganizmayı da (*Salmonella* sp., *protozoa*, toplam ve fekal koliform) içermektedir (Sekaran ve ark., 2007). Arıtma yapılmadan alıcı ortamlara deşarj edilen atıksular, su kaynaklarını kirletmekte ve kaynak kullanımını sınırlamaktadır (Khan ve ark., 2019). Atıksu karakterizasyonu, mevcut proseslerin kontrolü, optimizasyonu ve yeni proseslerin geliştirilmesi için kullanılmaktadır (Tekeli & Arslan, 2008; Erkuş ve ark., 2018). Sınırlı olan su kaynaklarımızın verimli şekilde kullanılabilmesi için arıtılması istenen atıksuların karakterizasyonunun (AKM, azot, biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), pH, yağ ve gres, vb.) belirlenmesi, uygun arıtma maliyetleri dikkate alınarak tasarımının yapılması ve tesisin sorunsuz işletilmesi çok önemlidir (Eren ve ark., 2007). Atıksuların çevre mevzuatlarında belirtilen standartları sağlaması, uygun şekilde tasarlanmış arıtma teknolojileri ile mümkündür. Küçük ölçekli arıtma tesislerinde kullanılan aerobik biyolojik arıtma teknolojileri, aktif çamur ile sabit ve hareketli yataklı reaktörlerin farklı varyantlarını içermektedir. Aerobik biyolojik arıtma düşük nüfusa sahip evsel atıksularının arıtılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif çamur prosesinin tasarımı, tesislerin yüksek arıtma verimleri, inşaat ve işletme maliyetleri açısından büyük önem taşımaktadır (Tekeli & Arslan, 2008). Bu tesislerdeki BOİ giderme verimleri, yeterli şekilde çalıştıklarında %90'dan fazladır (Colmenarejo ve ark., 2006). Atıksu arıtma tesislerinin (ATT) odak noktası, doğal sulara deşarj edilecek atıksudaki BOİ ve KOİ'yi azaltmaktır. Yüksek BOİ içeren atıksular alıcı sulara deşarj edilirse su ortamında bakteri üremesi hızlanacak ve oksijen seviyeleri düşecektir ve bu durum çoğu balık ve sucul canlılar için ölümcül etkilere neden olacaktır (Salem ve ark., 2011).

Atıksu arıtımında kullanılan biyolojik proseslerin genel amaçları; yüzeysel sularda çözünmüş oksijenin (ÇO) azalmasına neden olan organik madde, AKM ve patojen bakterilerin giderilmesi olarak sıralanabilir. Evsel atıksular önemli oranda azot ve fosfor içermektedirler, bu nedenle deşarj edildikleri ortamlarda ötrofikasyona sebep olurlar (Zhang ve ark., 2009). Ötrofikasyon özellikle göllerde ve akış hızı düşük nehir veya ırmaklarda yaşamı sürdüren balık ve diğer canlılar üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Mulkerrins ve ark., 2004). Geçmişte, evsel atıksu arıtımı temel olarak organik karbon giderimi ile sınırlıydı. Son yıllarda, alıcı sularda artan kirlilik ve hassas bölgelere deşarjlar için katı atık sınırlamaları getirilerek karbona ek olarak öncelikli kirleticiler sınıfında yer alan azot, fosfor gibi diğer önemli parametreleri kontrol etmek için yeni arıtma tekniklerinin geliştirilmesi zorunluluk haline gelmiştir (Tekeli & Arslan, 2008). Azot ve fosfor gibi besin maddelerini atıksudan uzaklaştırmak için ikincil arıtma aşamasında nitrifikasyon-denitrifikasyon işlemlerini gerçekleştirecek prosesler mevcuttur (Özkan ve ark., 2012).

Bu çalışmanın amacı, Van ilinde bulunan küçük ölçekli iki farklı evsel atıksu arıtma tesisinin, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde (SKKY)'de belirtilen deşarj standartlarına göre davranışlarını analiz etmek ve bu tesislerin performanslarını nihai olarak belirlemektir. Bunun için 2021 Ocak (yağışlı dönem) ve 2021 Temmuz (kurak dönem) aylarında tesislerin giriş ve çıkışlarından numuneler alınarak analizleri gerçekleştirilmiştir.



## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, Van ilinde bulunan Edremit ve Gevaş ilçelerindeki AAT'lerinin 2021 Ocak (yağışlı dönem) ve 2021 Temmuz (kurak dönem) aylarında tesislerin giriş ve çıkışlarından alınan numuneler analiz edilerek fizikokimyasal parametreler (pH, sıcaklık, ÇO, elektriksel iletkenlik, BOİ, yağ ve gres, toplam fosfat (TP), toplam azot (TN), KOİ, AKM, alkalinite, asidite) analiz edilmiştir. Bu atıksu arıtma tesislerinin performansı, çeşitli fizikokimyasal parametrelerin analizine dayalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca arıtım verimleri ve çıkış suyu parametrelerinin SKKY'de belirtilen standart değerler ile karşılaştırılması yapılmıştır.

### 2.1. Edremit evsel atıksu arıtma tesisi

Edremit evsel AAT 100 000 eşdeğer nüfusa sahip bir kapasitede ve maksimum 21.840 m<sup>3</sup>/gün debi ile çalıştırılacak şekilde dizayn edilmiştir. Mevcut AAT'nin biyolojik arıtma kademesinde karbonlu maddeler, azot ve fosfor giderimi yapılmaktadır. Tesise gelen atıksular ilk olarak birincil arıtım (fiziksel arıtım) işleminden geçirilmektedir. Daha sonra atıksular ikincil arıtım (biyolojik arıtım) aşamasında biyolojik arıtım işleminden geçirilip çökeltme havuzuna alınmakta ve buradan da 600 m'lik kolektörlerle Van gölüne deşarj edilmektedir (Şekil 1). Çökeltme havuzunda bulunan biyolojik arıtım çamurları ise tesiste bulunan susuzlaştırma (santrifüj dekantörler) ünitelerine gönderilmektedir. Susuzlaştırılan çamur kekleri traktörler ile evsel katı atık depolama sahasına taşınmaktadır (Durak ve ark., 2021).



Şekil 1. Edremit evsel atıksu arıtma tesisi (Durak, 2020).

### 2.2. Gevaş evsel atıksu arıtma tesisi

Gevaş ilçesinde bulunan evsel AAT İller Bankası Genel Müdürlüğü tarafından yaptırılarak 2015 yılında işletmeye alınmıştır. Evsel AAT çıkış suları hassas koruma alanı olarak belirlenmiş Van gölüne deşarj edilmektedir. Hassas alanlar için SKKY ve Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliğinde (KAAY) bazı deşarj standartları belirlenmiştir. Bu nedenle tesiste karbon, azot ve fosfor giderimi gereklidir. Gevaş AAT 22.000 eşdeğer nüfusa sahip bir kapasitede inşa edilmiştir. Tesisin uzun havalandırılmalı aktif çamur havuzu 7.607 m<sup>3</sup>/gün kapasitesindedir. Birincil arıtmadan geçen atıksular daha sonra ileri biyolojik arıtım kademesine gönderilerek burada karbon, azot ve fosfor giderimi yapılmaktadır (Durak, 2020).

Arıtım tesisinin ileri biyolojik arıtım kademesi "Carousel Hendeği" şeklinde olan havuz şeklindedir (Şekil 2). Havuzun bazı bölümlerinde oksik ve anoksik şartlar oluşturularak atıksuda bulunan azotun giderimi nitrifikasyon-denitrifikasyon prosesiyle sağlanmaktadır. Biyolojik arıtmadan geçen atıksular son çökeltme havuzuna gönderilmekte ve buradan da Van Gölü'ne deşarj edilmektedir.



Şekil 2. Gevaş evsel atıksu arıtma tesisi (Durak, 2020).

### 2.3. Parametrelerin tayini

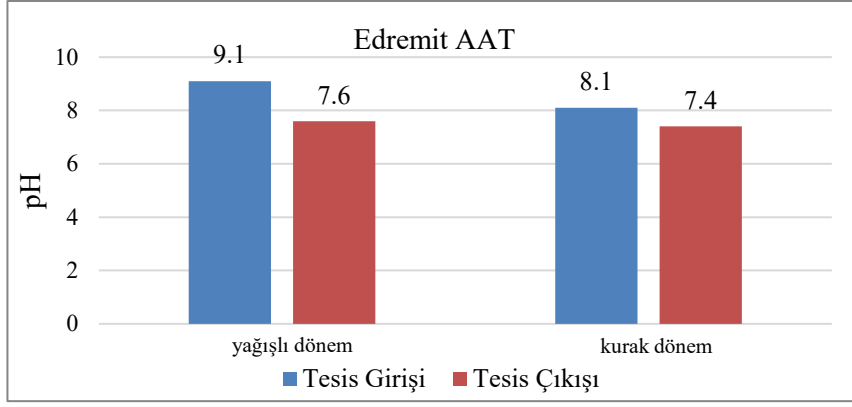
Çalışmada atıksu örnekleri Edremit ve Gevaş Eysel AAT giriş ve çıkış noktalarından 23 Ocak 2021 ve 05 Temmuz 2021 tarihlerinde 2 saatlik kompozit numune olarak alınmıştır. Fiziksel parametreler (pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık, vb.) YSI 556 MPS multimetre cihazı ile yerinde ölçülmüştür, kimyasal parametreler ise Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Çevre Mühendisliği Araştırma Laboratuvarına getirilerek aynı gün analiz edilmiştir. Tüm analizler, Standart Metotlara (APHA, 2012) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. BOİ ölçümleri SM5210 D analiz metoduna göre, yağ ve gres SM 5521 D metoduna göre, toplam fosfor tayini SM 4500 P/B-D ve toplam azot tayini ise SM Norg B TS 6231 metotlarına göre yapılmıştır. KOİ analizleri WTW photolab 6100 vis model spektrofotometre kullanılarak kapalı reflüx kolorimetrik yöntemle yapılmıştır (Eaton, 1995). Katı madde analizleri ise standart metotlara göre yapılmıştır (APHA, 2012).

## 3. Bulgular ve Tartışma

Edremit ve Gevaş AAT'lerinden 2021 yılı yağışlı dönem ve kurak dönemde örneklenen atıksu numunelerinde pH, sıcaklık, ÇO, elektriksel iletkenlik, KOİ, BOİ, yağ ve gres, TP, TN, AKM, alkalinite, asidite, parametreleri tayin edilmiştir. Eysel atıksu arıtma tesisleri atıksularının karakterizasyon çalışması sonuçları, atıksuların özelliklerinin geniş bir yelpazede değiştiğini göstermektedir. Edremit ve Gevaş AAT öncelikle karbon ve azot giderimi için tasarlanmıştır. Tesise gelen evsel atıksu, SKKY' de verilen (SKKY, 2004) deşarj standartları dikkate alınarak arıtılmakta ve Van gölüne deşarj edilmektedir.

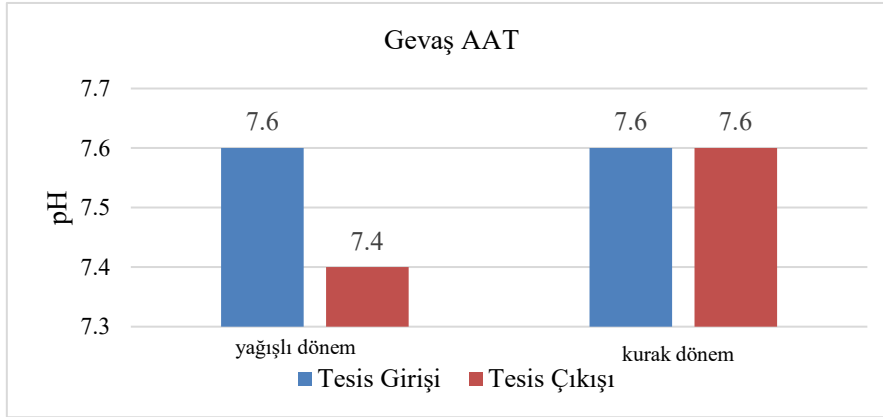
### 3.1. pH

Eysel atıksu arıtma tesislerinde yaygın olarak kullanılan arıtım yöntemlerinden biyolojik arıtım dikkate alındığında atıksu karakterizasyonunda önemli olan parametrelerden biri de pH'dır. Etkili bir biyolojik arıtım performansının sağlanması için en uygun pH değeri 7 olarak literatürde belirtilmiştir (Cırık & Eskikaya, 2018). Edremit AAT'nin giriş ve çıkış sularına ait pH ölçümleri dikkate alındığında yağışlı dönem giriş ve çıkış pH değerleri sırasıyla 9.1 ve 7.6 olurken kurak dönem giriş ve çıkış pH değerleri sırasıyla 8.1 ve 7.4'tür (Şekil 3).



Şekil 3. Edremit AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) pH değerleri.

Gevaş AAT'nin kış dönem giriş ve çıkış pH değerleri Şekil 4 incelendiği zaman sırasıyla 7.6 ve 7.4 olurken kurak dönem giriş ve çıkış pH değerleri ise 7.6 olarak ölçülmüştür.



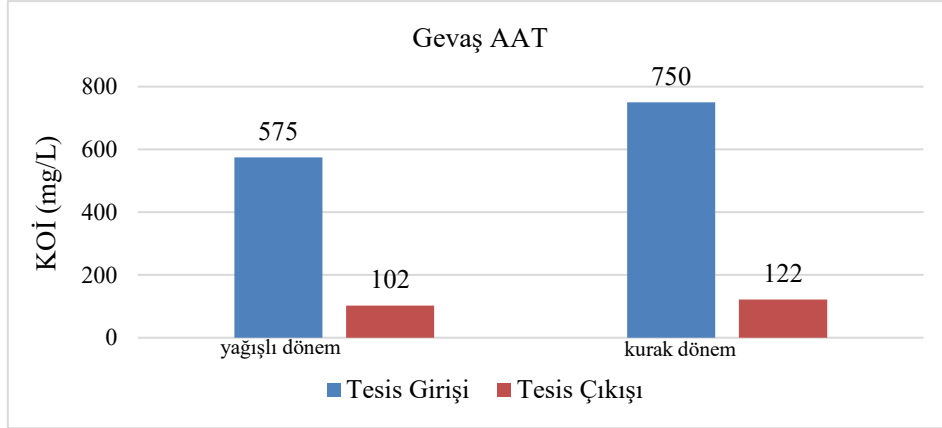
Şekil 4. Gevaş AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) pH değerleri.

Edremit ve Gevaş AAT'lerinin pH değerleri hem arıtılmadan önce hem de arıtım sonrasında  $\text{pH} > 7$  yani alkali özelliktedir. SKKY deşarj standartlarına göre nüfusu 10 000 ila 100 000 arasında olan ve nüfusu 100 000 kişiden fazla olan kent merkezli evsel atıksuların 2 saatlik kompozit örnekte alıcı ortama deşarj standardı, pH parametresi için 6 ila 9 arasındadır. Yapılan pH ölçümleri sonucunda arıtma tesisi çıkış sularının pH değerleri SKKY'de verilen limit değerlere uygundur. Mevsimsel değişikliğin AAT atıksularının pH'ı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı kanısına varılmıştır (Cırık & Eskikaya, 2018).

### 3.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)

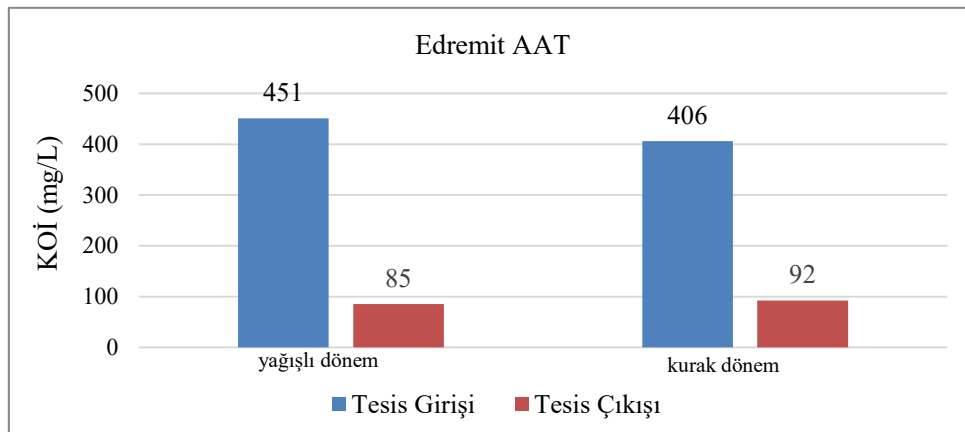
Atıksuların karakterizasyonunda KOİ önemli ve hızlı sonuç verebilen ve atıksu arıtma tesislerinin tasarımında kullanılan bir parametredir. Kimyasal olarak oksitlenebilecek bileşikler, biyolojik olarak oksitlenebileceklerden daha fazla olduğu için, KOİ değeri BOİ değerinden her zaman büyüktür ve KOİ, atıksuda bulunan organik madde miktarını belirlemek için kullanılmaktadır (Sawyer ve ark., 2003). KOİ değerinin belirlenmesi esnasında, biyolojik parçalanma reaksiyonlarına değil organik maddelerin kimyasal olarak oksitlenerek  $\text{CO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$ 'ya dönüştürülmesi dikkate alınmaktadır (Kumar & Chopra, 2012).

Şekil 5' teki Gevaş AAT'nin yağışlı ve kurak dönemde ölçülen çıkış KOİ değeri sırasıyla 102 mg/L ve 122 mg/L'dir. SKYY'ye göre nüfusu 10 000 ila 100 000 kişi arasında olan kent merkezli evsel atıksularının alıcı ortama deşarj standardı 2 saatlik kompozit numunede ölçülen KOİ değeri 140 mg/L'dir. Bu değerlere göre Gevaş tesisinin KOİ çıkış değerleri SKKY deşarj standartlarına uygundur. Ayrıca KOİ giderim verimleri kış ve yaz aylarında sırasıyla %82 ve %84'dür.



Şekil 5. Gevaş AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) KOİ değerleri.

Edremit AAT'nin yağışlı ve kurak dönemlerde ölçülen çıkış KOİ değeri Şekil 6' da verildiği üzere sırasıyla 85 mg/L ve 92 mg/L'dir. Burada yağışlı dönemde düşük sıcaklık organik maddelerin daha az parçalanmasına ancak kurak dönemdeki yüksek sıcaklık ise organik maddelerin daha fazla parçalanmasına ve KOİ değerlerinin kışın daha düşük olmasına sebep olduğu öngörülmektedir (Zhang ve ark., 2020). Yapılan bir çalışmada kış sezonu boyunca en yüksek çıkış KOİ konsantrasyonları, Aralık ayında 102 mg/l, Ocak ayında 124 mg/l ve Şubat ayında 110 mg/l olarak; en düşük KOİ konsantrasyonları ise Aralık ayında, 80 mg/l, Ocak ayında 71 mg/l ve Şubat ayında 95 mg/l olarak tespit edilmiştir. En yüksek KOİ verimi Aralık ayında %52.4, Ocak ayında %54.7 ve Şubat ayında %51.5 olarak; en düşük KOİ verimi ise Aralık ayında %41.2, Ocak ayında %26 ve Şubat ayında %27.9 olarak tespit edilmiştir (Topal & Topal, 2011). Yine Tanyol & Uslu (2013) tarafından yapılan bir çalışmada Tunceli ili Evsel AAT giriş ve çıkış sularında KOİ giderim verimlerini sırasıyla en az %82, en çok %95 olarak tespit edilmiştir. SKYY'ye göre nüfusu 100 000 kişiden fazla olan kent merkezli evsel atıksularının alıcı ortama deşarj standardı, 2 saatlik kompozit numunede KOİ için 120 mg/L'dir. Bu değerlere göre Gevaş tesisinin KOİ çıkış değerleri SKKY deşarj standartlarına uygundur. Ayrıca giderim verimleri yağışlı ve kurak dönemlerde sırasıyla %81 ve %77'dir. Doğan (2010) tarafından yapılan çalışmada İzmir-Çiğli Atıksu Arıtma Tesisinde kış aylarında KOİ giderim verimini %72, Kayseri Atıksu Arıtma Tesisinde ise ilkbahar aylarında KOİ giderim verimini %98 olarak gözlemlemiştir.

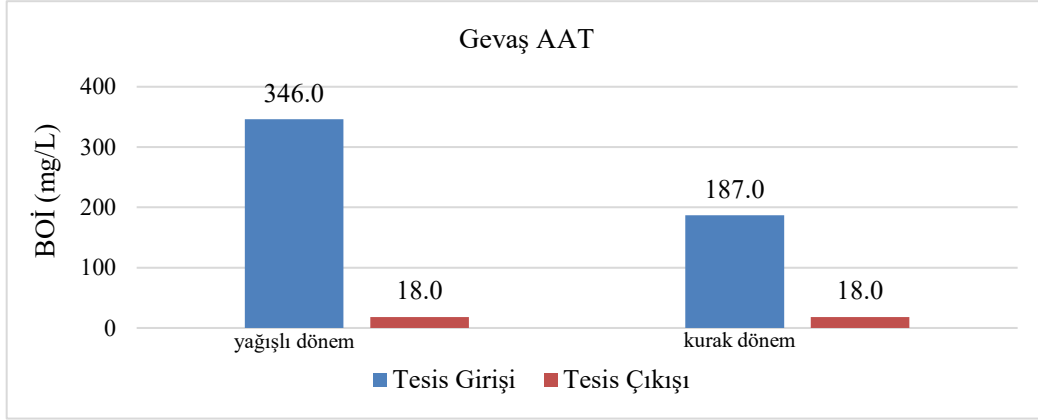


Şekil 6. Edremit AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) KOİ değerleri.

### 3.3. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ)

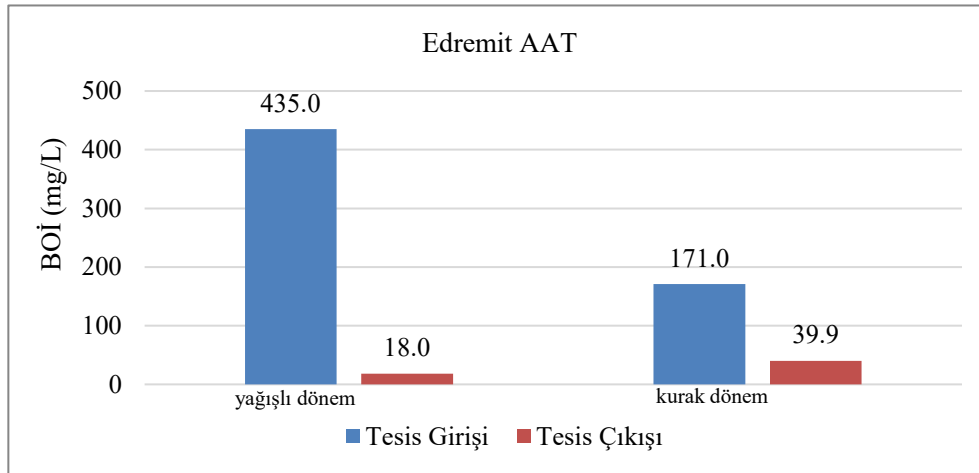
BOİ, biyokimyasal reaksiyonlarla organik maddelerin parçalanabilmesi için gerekli oksijen miktarını ifade eder (Çepni, 2017). Şekil 7 'de Gevaş AAT'nin giriş ve çıkışından 2021 yılı yağışlı ve

kurak mevsimlerinde alınan numunelerin BOİ değerleri verilmektedir. SKYY'ye göre nüfusu 10 000 ila 100 000 kişi arasında olan kent merkezli evsel atıksuların alıcı ortama deşarj standardı, 2 saatlik kompozit numunede BOİ için 50 mg/L'dir. Bu değerlere göre Gevaş tesisinin çıkış değerleri SKKY deşarj standartlarına uymaktadır.



Şekil 7. Gevaş AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) BOİ değerleri.

Şekil 8'de Edremit AAT'nin giriş ve çıkışından yağışlı ve kurak dönemlerde alınan numunelerin BOİ değerleri verilmektedir. SKYY'ye göre nüfusu 100 000 kişiden fazla olan kent merkezli evsel atıksuların alıcı ortama deşarj standardı, 2 saatlik kompozit numunede BOİ için 40 mg/L'dir. Bu değerlere göre Edremit AAT'nin çıkış değerleri standartlara uymaktadır. [Tanyol & Uslu \(2013\)](#) Tunceli ilindeki evsel AAT'nde yaptıkları çalışmada AAT giriş ve çıkış sularında BOİ giderim verimini %83- 93 arasında tespit etmişlerdir. [Öz \(2009\)](#) endüstriyel bir AAT giriş ve çıkış noktalarından farklı zamanlarda aldıkları kompozit numunelerde BOİ analizi yapmışlardır, BOİ giderim verimi %96.8 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. Edremit AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) BOİ değerleri.

### 3.4. Toplam katı madde (TKM), askıda katı madde (AKM) ve toplam uçucu katı madde (TUKM)

103-105°C'de buharlaştırma işleminden sonra geriye kalan maddelerin tümü katı madde olarak sınıflandırılır ([Çepni, 2017](#)). Çizelge 1'de Edremit ve Gevaş AAT'lerinin giriş ve çıkışından alınan atıksu numunelerinin TKM, AKM ve TUKM değerleri verilmiştir. AKM giderim verimi Gevaş AAT için yağışlı ve kurak dönem için sırasıyla; %88, %98 iken Edremit AAT için ise %90 ve %84'dür. İncelenen iki tesis için AKM giderim verimi mevsimsel olarak değişiklik göstermektedir. Yani birinde kurak dönemde yüksek verim elde edilirken diğesinde yağışlı dönemde yüksek verim



görülmesinin nedeni bir çok faktöre bağlı olabilir. Edremit AAT'nin temmuz ayında AKM giderim veriminin düşük olmasının nedeni giriş atıksuyundaki kirlilik yüklerinin düşmesinden kaynaklanabilir (Tatar & Sağlam, 2020). Ayrıca Edremit ilçesinin kanalizasyon ve yağmursuyu alt yapısı, arıtma tesisine gelen atıksuyun katı madde miktarı ve buna bağlı olarak arıtma tesisi kapasitesi giderim verimini etkileyen faktörler arasında bulunmaktadır (Ataklı & Balık, 2022). Literatürde benzer sonuçlar mevcuttur. Tunceli evsel atıksu arıtma tesisinde Haziran ayı yani kurak dönemde AKM giderim verimi %84 olarak bildirilmiştir (Tanyol & Uslu, 2013). Şama (2017) tarafından yapılan çalışmada Taşköprü AAT' nin giriş ve çıkış sularında AKM giderim verimini; en az %73.3, en çok %95.5 ve ortalama %90 olarak bildirilmiştir.

SKYY' ye göre nüfusu 10 000 ila 100 000 kişi arasında olan kent merkezli evsel atıksularının yüzeysel sulara deşarj standardı, 2 saatlik kompozit numunede AKM için 45 mg/L, nüfusu 100 000 kişiden çok olan yerleşim merkezleri için ise 40 mg/L'dir. Standartlarla karşılaştırıldığında AKM değerlerinin Gevaş ve Edremit Atıksu Arıtma Tesisleri için SKKY'nin deşarj standartlarına uyduğu gözlenmiştir. TKM giderim verimi Gevaş AAT için yağışlı ve kurak dönemde sırasıyla; %47, %38 iken Edremit AAT için ise %31 ve %17 dir. Edremit ve Gevaş AAT giriş ve çıkış sularında ölçülen TUKM değerleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. TUKM giderim verimi ise Gevaş AAT için yağışlı ve kurak dönemde sırasıyla; %50, %62 iken Edremit AAT için ise %63 ve %71 olmuştur.

Çizelge 1. Edremit ve Gevaş AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) AKM, TKM ve TUKM giderim verimleri

Lokasyon	Dönem	AKM			TKM			TUKM		
		Giriş mg/L	Çıkış mg/L	Verim %	Giriş mg/L	Çıkış mg/L	Verim %	Giriş mg/L	Çıkış mg/L	Verim %
Gevaş AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	315.0	37.0	88	742.0	392.0	47	402.0	200.0	50
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	247	4	98	730	453	38	380	145	62
Edremit AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	240.0	25.0	90	1020.0	700.0	31	570.0	212.0	63
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	207	33	84	853	707	17	520	150	71

### 3.5. Çözünmüş oksijen ve iletkenlik

Çözünmüş oksijen nehir, göl ve akarsu gibi yüzeysel su ortamlarında önemli parametrelerinden biridir. AAT çıkış suları alıcı su ortamlarına deşarj edildiği zaman bakteriler tarafından organik maddenin parçalanması sonucu çözünmüş oksijen azalır (Tanyol & Uslu, 2013). Sucul ortamda yaşayan canlılar için çözünmüş oksijen konsantrasyonunun en az 5 mg/L olması gerekmektedir (Kumar & Chopra, 2012). Gevaş AAT için yağışlı ve kurak dönemde giriş atıksuyundaki ÇO değerleri sırasıyla; 3.47 mg/L, 2.72 mg/L iken çıkış atıksuyunda ise ÇO değerleri sırasıyla; 6.82 mg/L, 4.8 mg/L dir. Edremit AAT yağışlı ve kurak dönem için giriş atıksuyunda ÇO değerleri sırasıyla; 1.86 mg/L, 1.2 mg/L iken çıkış atıksuyunda ÇO değerleri ise sırasıyla; 4.1 mg/L, 3.8 mg/L olmuştur. Bu verilere göre yağışlı dönem Gevaş AAT çıkış suları hariç diğer değerler 5 mg/L'nin altındadır. Çalışmamızda elde edilen ÇO (mg/L) ve elektriksel iletkenlik değerleri Çizelge 2' de verilmiştir. Elektriksel iletkenlik suda çözünmüş olan iyonların miktarını belirlemek için kullanılmaktadır. İletkenlik sucul ortamda yaşayan canlılar için tehdit oluşturan bir faktör değildir ancak farklı su kalitesi problemlerinin bir işaretçisi olarak kullanılabilir. Bir suyun sulama suyu olarak kullanılmasında önemli parametrelerden biri elektriksel iletkenliktir. Çünkü elektriksel iletkenlik iyon varlığı ve geçişi ile ilgili bir kavram olduğu için tuzluluk yani iyonik durum iletkenliği etkileyen faktörlerden birisidir. ABD Tuzluluk Laboratuvar Sistemi, sulama sularının sınıflandırılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Yaygın olan bu sisteme göre sular elektriksel iletkenliklerine göre dört başlık altında toplanmıştır. Bunlar az tuzlu 0-250 µS/cm, orta tuzlu 250-750 µS/cm, yüksek tuzlu 750 - 2250 µS/cm sulardır (Sağlam & Adiloğlu, 1997). Bu sisteme göre yağışlı mevsimde dönemde Gevaş giriş ve çıkış atıksuları orta tuzlu ancak Edremit giriş ve çıkış atıksuları ise yüksek tuzlu sular olarak



raporlanmıştır. Kurak dönemde ise Gevaş ve Edremit AAT'nin giriş ve çıkış suları orta tuzlu olarak bulunmuştur. İletkenlik için SKKY'de belirtilen herhangi bir limit değer bulunmamaktadır. Ayrıca mevsimlere bağlı oluşan değişimler, kar erimesi ve yağışlarla topraktan suya iyon geçişinin artması vb. nedenler, arıtma tesisi atıksularındaki iletkenlik değerinin mevsimlere göre değişken olmasına neden olmaktadır (Çepni, 2017).

Çizelge 2. Edremit ve Gevaş AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) çözülmüş oksijen ve iletkenlik değerleri

Lokasyon	Dönem	Çözülmüş Oksijen		İletkenlik	
		Giriş mg/L	Çıkış mg/L	Giriş $\mu$ S/cm	Çıkış $\mu$ S/cm
Gevaş AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	3.47	6.82	448	353
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	2.72	4.8	381	278
Edremit AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	1.86	4.1	946	837
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	1.2	3.8	543	235

### 3.6. Sıcaklık

Sıcaklık, biyokimyasal reaksiyonların hızını, gazların çözünürlüğünü, suyun yoğunluğunu ve viskozitesini, suda yaşayan mikroorganizmaların aktivitelerini etkileyen önemli bir parametredir. Evsel atıksu arıtma tesislerinin sıcaklık değerleri 10 ila 30 °C arasında değişmektedir. Sıcaklık arttıkça mikroorganizma faaliyetleri ve üreme hızı artmaktadır (Öztemel & Düğenci, 2016). Sıcaklık suda yaşayan canlıların yaşamsal aktivitelerini etkileyerek fizyolojilerinin değişmesine sebep olur. Arıtma tesislerinde sıcaklık faktörü ön çökeltme ve son çökeltme havuzlarında askıdaki maddelerin çökmesini etkiler, ayrıca mikroorganizmaların aktivitelerini gerçekleştirebilmesi için önemlidir. Edremit ve Gevaş Atıksu Arıtma tesislerinin giriş ve çıkışlarında ölçülen su sıcaklıkları Çizelge 3'te gösterilmiştir. Sıcaklık için SKKY de belirtilen herhangi bir limit değer bulunmamaktadır. Colmenarejo ve ark. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada Las Rozas/Madrid AAT'nin 8 farklı bölgesinde 19 ay boyunca atıksu numuneleri alınmış, ilgili numunelerin sıcaklık değerleri birbirine yakın ve mevsim sıcaklığına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 3. Edremit ve Gevaş AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) sıcaklık değerleri

Lokasyon	Dönem	Sıcaklık	
		Giriş (°C)	Çıkış (°C)
Gevaş AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	8.0	8.8
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	19.0	22.2
Edremit AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	11.7	10.6
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	19.0	24.7

### 3.7. Toplam azot, toplam fosfor

Endüstriyel üretim, insan atığı ve tarımsal faaliyetler sonucu atıksulara karışan azot formları nitrat ( $\text{NO}_3$ ), nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) ve amonyumdur ( $\text{NH}_4^+$ ). Evsel atıksularda amonyak bileşiklerinin nitrifikasyonu nedeniyle yüksek konsantrasyonlarda nitrit bulunmaz. Toplam Azot, Kjeldahl-azotu, ( $\text{NO}_3$ ) azotu ve ( $\text{NO}_2$ ) azotunun toplamı şeklinde ifade edilir (Cırık & Eskikaya, 2018; Çepni, 2017). Toplam fosfor polifosfat, ortofosfat ve organik fosfatın toplamından oluşur. Yüzeysel sularda fosforun

kaynakları tarımsal faaliyetler, evsel ve endüstriyel atıksulardır. Fosfor, atıksulardan kimyasal ve biyolojik arıtma prosesleri ile giderilmektedir (Samsunlu, 2006).

Çizelge 4'te Gevaş ve Edremit Atıksu Arıtma Tesislerinin giriş ve çıkışlarından 2021 Ocak (yağışlı dönem) ve 2021 Temmuz (kurak dönem) aylarında alınan numunelere ait TN ve TP değerleri verilmektedir. SKKY'ye göre eşdeğer nüfusu 10 000 ila 100 000 kişi arasında değişen kent merkezli evsel atıksuların yüzeysel su ortamlarına deşarj standardı 2 mg/L TP ve 15 mg/L TN, eşdeğer nüfusu 100.000'den fazla olan yerleşim yerlerinin ki ise 1 mg/L TP ve 10 mg/L TN şeklindedir. Buna göre Gevaş AAT'nin 2021 yağışlı ve kurak dönemlerde ölçülen TN ve TP değerleri ile Edremit Arıtma Tesisinin 2021 yağışlı ve kurak dönemlerde ölçülen TP değeri yönetmelikte belirtilen sınır değerleri içerisinde, fakat Edremit AAT 2021 yağışlı ve kurak mevsimlerde ölçülen TN değeri yönetmelik sınırları dışındadır. Literatürde bizim çalışmamıza benzer bulgular da yer almaktadır.

Çepni (2017) tarafından yapılan çalışmada Doğu AAT giriş sularında TN; 36-62 mg/L; çıkış sularında ise 4-10 mg/L arasında, Batı AAT giriş sularında 36-74 mg/L; çıkış sularında ise 4-11 mg/L arasında olduğu bildirilmiştir. Yine aynı çalışmada TP değerlerinin Doğu AAT giriş sularında 5-8 mg/L; çıkış sularında 0.4-2.5 mg/L arasında Batı AAT'de ise giriş sularında 4.6-9 mg/L; çıkış sularında 0.4-2 mg/L arasında olduğu bildirilmiştir.

Çizelge 4. Edremit ve Gevaş AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) TN ve TP değerleri

Lokasyon	Dönem	TN		TP	
		Giriş mg/L	Çıkış mg/L	Giriş mg/L	Çıkış mg/L
Gevaş AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	31.0	10.0	5.21	0.83
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	52	7	10	1.1
Edremit AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	75.0	21.0	10.4	0.95
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	67.0	11.0	11	0.28

### 3.8. Yağ ve gres, alkalinite ve sülfat

Gevaş ve Edremit AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) aylarında alınan numunelerden elde edilen yağ ve gres, sülfat ve alkalinite değerleri Çizelge 5'te verilmiştir. SKKY deşarj standartlarına göre yağ ve gres 50 mg/L olarak baz alındığında her iki tesisin de çıkış değerlerinin standardın altında olduğu görülmektedir. Benzer bulgular literatürde mevcuttur (Üstün, 2006).

SKKY deşarj standartlarına göre sülfat değeri 1700 mg/L olarak ifade edilmiştir. Buna göre Edremit ve Gevaş AAT'nin 2021 yağışlı ve kurak dönemlerine ait sülfat çıkış değerleri de SKKY'de belirtilen limitler dahilindedir. Çizelge 5, Endüstriyel Atıksuyun Az Miktarda Karıştığı Tipik Evsel Atıksu Bileşenleri (Henze & Comeau, 2008) ile kıyaslandığında alkalinite açısından kuvvetli evsel atıksu özelliğine sahip olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 5. Edremit ve Gevaş AAT yağışlı dönem (Ocak 2021) ve kurak dönem (Temmuz 2021) yağ ve gres, sülfat ve alkalinite değerleri

Lokasyon	Dönem	Yağ ve Gres		Sülfat		Alkalinite	
		Giriş mg/L	Çıkış mg/L	Giriş mg/L	Çıkış mg/L	Giriş mg/L	Çıkış mg/L
Gevaş AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	67.0	10.0	25.0	15.0	365.0	255.0
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	54.0	8.0	120.0	71.2	370.0	250.0
Edremit AAT	Yağışlı Dönem (Ocak 2021)	62.0	10.0	68.0	42.0	725.0	465.0
	Kurak Dönem (Temmuz 2021)	57.0	9.0	130.9	85.5	780.0	457.0

#### 4. Sonuç

Bu çalışmanın amacı Van ilinde bulunan Edremit ve Gevaş AAT atıksularının karakterizasyonlarının belirlenmesi ve fizikokimyasal parametrelerinin SKKY'deki sınır değerlerle karşılaştırılmasıdır. Tesislerin çıkış suları pH açısından SKKY ile kıyaslandığında sınır değer olan 6 ila 9 arasında olduğu gözlenmiştir. Edremit ve Gevaş AAT çıkış sularında tespit edilen KOİ ve BOİ değerleri incelendiğinde ise SKKY'de belirtilen limit değerler arasında oldukları sonucuna ulaşılmıştır. Gevaş AAT'nin KOİ için ortalama giderim verimi %83, Edremit AAT için ise yaklaşık %80, Gevaş AAT'nin BOİ için ortalama giderim verimi %92, Edremit AAT için ise yaklaşık %86 olarak bulunmuştur. AKM giderim verimi Gevaş AAT için yağışlı ve kurak dönem için sırasıyla; %88, %98 iken Edremit AAT için ise %90 ve %84 olmuştur. Edremit ve Gevaş AAT'nin çıkış sıcaklıkları incelendiğinde sırasıyla kurak mevsimde 24.7 ve 22.2 °C yağışlı mevsimde ise 10.6 ve 8.8 °C olarak belirlenmiştir. KOİ, BOİ, AKM, TN ve TP parametrelerinin gideriminde sıcaklık önemli bir parametredir. Sıcaklığın düşmesi biyolojik arıtma prosesinde bulunan bakterilerin biyolojik faaliyetlerini etkileyerek biyolojik arıtım veriminin azalmasına neden olur. Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'ne göre Gevaş AAT' nin kurak ve yağışlı dönemlerde ölçülen TN ve TP değerleri ile Edremit AAT'nin yağışlı ve kurak mevsimde ölçülen TP değeri yönetmelik sınırları içerisindedir. Fakat Edremit AAT' nin kurak ve yağışlı dönemde ölçülen TN değeri yönetmelik sınırları dışındadır. Gevaş ve Edremit AAT'lerinden kurak ve yağışlı döneminde alınan numunelerde ölçülen yağ ve gres ve sülfat değerleri SKKY deşarj standartlarına uyum sağlamaktadır.

Yapılan çalışma ile elde edilen sonuçların diğer atıksu arıtma tesisleri için yol gösterici olması amaçlanmış aynı zamanda AAT'lerden alıcı ortamlara deşarj edilecek atıksuyun daha zararsız ve hatta yeniden kullanılabilir olması için parametrelerin SKKY deşarj standartlarına uygunluğunun zaruri bir durum olduğu belirlenmiştir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün FYL-2020-9133 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- Ataklı, S., & Balık, İ. (2022). Ordu ili kentsel kıyı yerleşim yerlerinden denize verilen evsel atık su deşarjlarının araştırılması. *Aquatic Research*, 5(3), 186- 195. doi:10.3153/AR22018
- APHA. (2012) Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. 22nd Edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Cırık, K., & Eskikaya, O. (2018). Kahramanmaraş merkez atıksu arıtma tesisi giriş atıksuyunun karakterizasyonu. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(4), 286-294. doi:10.17780/ksujes.477288
- Colmenarejo, M. F., Rubio, A., Sanchez, E., Vicente, J., Garcia, M. G., & Borja, R. (2006). Evaluation of municipal wastewater treatment plants with different technologies at Las Rozas, Madrid (Spain). *Journal of Environmental Management*, 81(4), 399-404. doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.007
- Çepni, A. G. (2017). *Bursa ili kentsel atıksu arıtma tesisleri performanslarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi*. (PhD), Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Doğan, F. (2010). *Mevcut atıksu arıtma tesislerinin fosfor giderimi için rehabilitasyon seçeneklerinin değerlendirilmesi*. Çevre ve Orman Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü Su ve Toprak Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Türkiye.
- Durak, A. (2020). *Evsel atık suların arıtılmasında biyolojik arıtma yönteminin uygulanması ve işletme sorunlarının incelenmesi Van ili örneği*. (Yüksek Lisans Tezi), Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye.
- Durak, A., Özgüven, A., & Demir Yetiş, A. (2021). Van ili atıksu arıtma tesisleri işletme sorunları ve çözüm önerileri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4), 1448-1463. doi:10.17798/bitlisfen.960183

- Eaton, A. (1995). Measuring UV-absorbing organics: a standard method. *Journal - American Water Works Association*, 87, 86 - 90. doi:10.1002/j.1551-8833.1995.tb06320.x
- Eren, B., Suroğlu, B., Ateş, A., İleri, R., & Keleş, R. (2007, Mayıs). *Adapazarı kentsel atıksu arıtma tesisi atıksuyunun karakterizasyonunun incelenmesi ve değerlendirilmesi*. Üniversite Öğrencileri 2. Çevre Sorunları Kongresi, İstanbul.
- Erkuş, A., Oygün, E., Türkmenoğlu, M., & Aldemir, A. (2018). Boya endüstrisi atıksularının karakterizasyonu. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 308-319.
- Henze, M., & Comeau, Y. (2008). Wastewater characterization. In M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama, D. Brdjanovic, N. Mahmoud, M. Moussa (Eds.), *Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling and Design* (pp. 33-52). London, UK: IWA Publishing.
- Kavak, N. (2016). *Kayseri ili örneğinde, atık su arıtma tesislerinde uygulanan arıtma yöntemlerinin incelenmesi ve optimum yöntemin belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir, Türkiye.
- Khan, N. A., Khan, S. U., Islam, D. T., Ahmed, S., Farooqi, I. H., Isa, M. H., ... & Dhingra, A. (2019). Performance evaluation of column-SBR in paper and pulp wastewater treatment: Optimization and bio-kinetics. *Desalination and Water Treatment*, 156, 204-219. doi:10.5004/dwt.2019.23775
- Kumar, V., & Chopra, A. K. (2012). Monitoring of physico-chemical and microbiological characteristics of municipal wastewater at treatment plant, Haridwar City (Uttarakhand) India. *Journal of Environmental Science and Technology*, 5(2), 109-118. doi:10.3923/jest.2012.109.118
- Momeni, S., Alimohammadia, M., Naddafia, K., Nabizadeha, R., Changania, F., Zareid, A., & Rahmatinia, M. (2019). Study of sludge from the largest wastewater treatment plant in the Middle East (southern Tehran, Iran) based on chemical and microbiological parameters for use in agriculture. *Desalination Water Treatment*, 160, 153-160. doi:10.5004/dwt.2019.24369
- Mulkerrins, D., Dobson, A. D. W., & Colleran, E. (2004). Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters. *Environment International*, 30(2), 249-259. doi:10.1016/S0160-4120(03)00177-6
- Öz, A. (2009). *Atıksu arıtma tesislerinde verimlilik kontrolü ve işletme sorunları*. (Yüksek Lisans Tezi), Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye.
- Özkan, O., Oğuz, M., & Özdemir, Ö. (2012). Characterization and assessment of a large-scale domestic advanced wastewater treatment plant in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(9), 5275-5281. doi:10.1007/s10661-011-2338-6
- Öztemel, E., & Düğenci, M. (2016, Kasım). *Atıksu arıtma tesis kontrolde yapay sinir ağı ile kirlilik parametre tahmini*. 3rd International Symposium on Environment and Morality, Alanya, Türkiye.
- Sağlam, M. T., & Adiloğlu, A. (1997). *Su Kalitesi*. Tekirdağ, Türkiye: Trakya Üniversitesi Tekirdağ Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Salem, I.B., Ouardani, I., Hassine, M., Aouni, M. (2011). Bacteriological and physico-chemical assessment of wastewater in different region of Tunisia: Impact on human health. *BMC Research Notes*, 4, 144. doi:10.1186/1756-0500-4-144
- Samsunlu, A. (2006). *Atık Suların Arıtılması*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Sawyer, C. N., McCarthy, P. L., & Parkin, G. F. (2003) *Chemistry for Environmental Engineering and Science* (5<sup>th</sup> ed.). New York, USA: McGraw-Hill.
- Sekaran, G., Ramani, K., Kumar, A. G., Ravindran, B., Kennedy, L. J., & Gnanamani, A. (2007). Oxidative destabilization of dissolved organics and *E. coli* in domestic wastewater through immobilized cell reactor system. *Journal of Environmental Management*, 84(2), 123-133. doi:10.1016/j.jenvman.2006.05.012
- SKKY. (2004). *Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği*. 31.12.2004 Tarih ve 25687 Sayılı Resmi Gazete, Ankara.
- Şama, A. (2017). *Taşköprü (Kastamonu) atıksu arıtma tesisi için proje aşamasında öngörülen ve mevcut durumda sağlanan verimin sürekliliğinin karşılaştırılması*. (Uzmanlık Tezi), İller Bankası Anonim Şirketi, Türkiye.

- Tanyol, M., & Uslu, G. (2013). Tunceli evsel atıksu arıtma tesisinin arıtma etkinliğinin değerlendirilmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(2), 24-29.
- Tatar, Ş., & Sağlam, M. (2020). Kızıltepe ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinin KOİ, BOİ<sub>5</sub> ve AKM yönünden işletme verimliliğinin değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 20, 265-269. doi:10.31590/ejosat.770260
- Tekeli, A. N., & Arslan, A. (2008). Characterization and assessment of “Kullar Domestic Wastewater Treatment Plant” wastewaters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 138(1), 191-199. doi:10.1007/s10661-007-9763-6
- Topal, M., & Topal, E. I. A. (2011). 2010-2011 kış sezonunda Elazığ Belediyesi atıksu arıtma tesisinin bazı parametrelerle değerlendirilmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 32(2), 1-12.
- Üstün, G. E. (2006). *Bursa Organize Sanayi Bölgesi (BOSB) atık su arıtma tesisi çıkış sularının geri kazanılabilirliğinin araştırılması*. (PhD), Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Zhang, T., Ding, L., Ren, H., & Xiong, X. (2009). Ammonium nitrogen removal from coking wastewater by chemical precipitation recycle technology. *Water Research*, 43(20), 5209-5215. doi:10.1016/j.watres.2009.08.054
- Zhang, X., Huang, J., Lin, L., Liu, S., Wang, Y., Zhang, S., (2020). A typical case study of the operational performance of municipal wastewater treatment plant in China. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15(S1), e2476. doi:10.1002/apj.2476





## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Ampirik Mod Ayırıştırmasına Dayalı ARIMA Modeli Kullanılarak Van İli Hava Kirliliğinin Tahmini

Erdoğan ALADAĞ

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye  
Erdoğan ALADAĞ, ORCID No: 0000-0003-1354-0930  
Sorumlu yazar e-posta: erdincaladag@gmail.com

#### Makale Bilgileri

Geliş: 17.12.2022  
Kabul: 01.02.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1220578

#### Anahtar Kelimeler

ARIMA,  
DES,  
EMD-ARIMA,  
PM<sub>10</sub>,  
SO<sub>2</sub>,  
Van

**Öz:** Hava kirliliği, yaşam kalitesini doğrudan tehdit eden ana unsurlardan birisidir. Hava kirlenmelerindeki değişimlerin öngörülmesi, hava kirliliği kontrolünde ve yönetiminde önemli bir role sahiptir. Günümüzde kullanılan Çift Üstel Düzeltme (DES) ve Bütünleşik Otoregresif Hareketli Ortalama (ARIMA) gibi geleneksel yöntemler, hava kirliliğinin tahmin edilmesinde çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, hava kalitesinin belirlenebilmesi için daha etkili tekniklerin üretilmesine ihtiyaç vardır. Bu araştırmanın temel amacı, yukarıdaki sorunları ele alarak doğruluğu yüksek bir hava kirliliği tahmin teorisi geliştirmektir. Önerilen yaklaşım, Ampirik Mod Ayırıştırması (EMD) algoritması ve ARIMA modelinin bir arada uygulandığı melez bir yöntemdir. EMD-ARIMA yönteminin tahmin becerisini belirlemek için Türkiye'nin Van şehir merkezindeki PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> hava kirlenmelerine ait 2019-2020 kış dönemindeki veriler kullanılmıştır. MAE, MAPE, RMSE ve R<sup>2</sup> performans ölçütlerine göre EMD-ARIMA modeli ile PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> için sırasıyla 7.25 µg/m<sup>3</sup>, %20.58, 8.84 µg/m<sup>3</sup>, 0.87 ve 7.58 µg/m<sup>3</sup>, %20.73, 8.96 µg/m<sup>3</sup>, 0.71 değerleri elde edilmiştir. Bulgular EMD-ARIMA yönteminin, geleneksel DES ve ARIMA tahmin modellerine göre daha hassas bir tahmin becerisine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Önerilen melez yaklaşım, hava kirliliğinin öngörülmesi ve azaltılmasına yönelik basit ve etkili bir yöntem olarak kullanılabilir.

### Prediction of Air Pollution in Van Province Using ARIMA Model Based on Empirical Mode Decomposition

#### Article Info

Received: 17.12.2022  
Accepted: 01.02.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1220578

#### Keywords

ARIMA,  
DES,  
EMD-ARIMA,  
PM<sub>10</sub>,  
SO<sub>2</sub>,  
Van

**Abstract:** Air pollution is one of the main factors that directly threatens the quality of life. Predicting changes in air pollutants has an important role in air pollution control and management. Traditional methods such as Double Exponential Smoothing (DES) and Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) used today are often insufficient for estimating air pollution. Therefore, more effective techniques are needed to determine air quality. The main purpose of this research is to develop a highly accurate air pollution prediction theory by addressing the above problems. The proposed approach is a hybrid method in which Empirical Mode Decomposition (EMD) algorithm and ARIMA model are applied together. To determine the estimation ability of the EMD-ARIMA method, data on PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> air pollutants in the city center of Van, Türkiye, in the winter period of 2019-2020 were used. According to MAE, MAPE, RMSE and R<sup>2</sup> performance criteria, values of 7.25 µg/m<sup>3</sup>, 20.58%, 8.84 µg/m<sup>3</sup>, 0.87 and 7.58 µg/m<sup>3</sup>, 20.73%, 8.96 µg/m<sup>3</sup>, 0.71 were obtained for PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> with EMD-ARIMA model, respectively. The findings reveal that the EMD-ARIMA method has a more sensitive estimation ability than traditional



DES and ARIMA estimation models. The proposed hybrid approach can be used as a simple and effective method for predicting and reducing air pollution.

## 1. Giriş

Hava kirliliği, dünyanın büyük bir bölümünü etkisi altına alan en önemli çevre ve sağlık sorunlarından birisidir (Kurt & Oktay, 2010). Son yıllardaki hızlı ekonomik kalkınma ve plansız kentleşme sonucunda şehir merkezlerindeki nüfus yoğunluğu dramatik bir şekilde artış göstermiştir. Evsel ısınma, yeterli baca bakımının yapılmaması, motorlu taşıtlar ve organize sanayi bölgeleri; dış ortam hava kalitesindeki belirgin azalmanın en büyük sebepleridir (Hao ve ark., 2018). Bu tür antropojenik kaynaklardan atmosfere salınan 10 µm'den küçük partikül madde (PM<sub>10</sub>), kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), azot dioksit (NO<sub>2</sub>), karbon monoksit (CO) ve ozon (O<sub>3</sub>) gibi birincil kirleticiler hava kirliliğinin ana bileşenleri arasında gösterilmektedir (Sheng & Tang, 2016). Ek olarak bölgenin coğrafi yapısı ve meteorolojik koşulları kent merkezlerindeki hava kalitesini etkileyen diğer önemli belirleyicilerdir (Varaprasad ve ark., 2021; Volna ve ark., 2021). Hava kirliliği, besin kaynaklarının zarar görmesi, asit yağmurlarının oluşması ve küresel ısınma gibi ciddi çevresel etkilerin yanı sıra yaşam kalitesinin düşmesi ve beklenen ömür süresinin kısalması gibi sağlık problemlerinden de sorumlu tutulmaktadır (Quah & Boon, 2003; Levy ve ark., 2013; Ostro ve ark., 2014).

Küresel çaptaki başlıca ölüm ve hastalık nedenlerinin belirlenmesine yönelik 204 ülkenin katılımıyla hazırlanan Küresel Hastalık Yüğü (The Global Burden of Disease) çalışmasına göre dış ortam hava kirliliği, tüm dünyada insan sağlığını tehdit eden altıncı risk faktörüdür (Murray ve ark., 2020). Aynı zamanda inme, kalp hastalıkları, akciğer kanseri ve astım gibi solunum yolu hastalıkları da dahil olmak üzere önde gelen diğer önemli ölüm nedenlerinin birçoğunu dolaylı yoldan etkilemektedir (WHO, 2022). Özellikle çocuklar, hamileler ve yaşlılar ile solunum yolu ve kardiyovasküler rahatsızlıkları olan hastalar da dahil olmak üzere nüfusun daha hassas ve savunmasız bireylerini tehdit eden ana unsurlardan birisi olarak görülmektedir (Sheng & Tang, 2016). Ayrıca Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) ülkelerinde yapılan bir araştırmaya göre hava kirliliği gibi çevresel etkenlere bağlı sağlık harcamaları gayri safi yurtiçi hasılanın (GSYİH) yaklaşık onda birine karşılık gelmektedir (Mujtaba & Shahzad, 2021). Hava kirliliği, küresel sağlık sistemine getirdiği ek maliyetin yanında üretim ve işletme kapasitesini de olumsuz etkileyebilir. Hava kirliliğinin yol açtığı sağlık problemlerine bağlı olarak çalışanların hastalıklarının artması, üretim süreçlerinin yavaşlamasına ve finansal zarara neden olabilmektedir (Gautam & Bolia, 2020). Gelecek dönemlerdeki hava kalitesinin belirlenmesi, çevre kirliliği kaynaklı sağlık harcamalarının ve ekonomik kayıpların azaltılmasına yönelik çalışmaların yürütülmesine büyük katkı sağlayacağına inanılmaktadır.

Türkiye, diğer gelişmekte olan ülkeler gibi özellikle 1950'lerden sonra sanayileşme ve şehirleşme nedeniyle hava kirliliğinden en çok etkilenen ülkeler arasında yer almaktadır (Sümer, 2014). Ülkemizdeki hava kirliliği, çoğunlukla hane ısınmasında düşük kaliteli katı yakıt kullanımı ve motorlu araçlardan salınan yoğun egzoz dumanından kaynaklanmaktadır (Elbir ve ark., 2000; Akbostancı ve ark., 2009; Aladağ, 2023). Ayrıca kömür ile elektrik üreten termik santraller ve diğer endüstriyel faaliyetler de önemli etkiye sahiptir (Zeydan & Pekkaya, 2021). İlk olarak Ankara'da kurulan hava kalitesi izleme istasyonları, 1985 yılından itibaren ülke geneline yayılmıştır. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından geliştirilen ulusal ağ sistemi ile düzenli olarak hava kalitesi takibi gerçekleştirilmektedir (Bayram, 2005). Günümüzde 357 adet hava kalitesi izleme istasyonunda başlıca PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> olmak üzere NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> ve 2.5 µm'den daha küçük partikül madde (PM<sub>2.5</sub>) ölçümü yapılmaktadır. Bu istasyonlardan elde edilen verilere göre 80 ilin havası Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) kriterlerine göre kirlidir (Alkan, 2018). 2019 yılında DSÖ tarafından belirlenen kılavuz değerlere uyulmadığı için hava kirliliğine bağlı sağlık problemleri sonucunda 30 binin üzerinde erken yaşam kaybı gerçekleşmiştir (Güzel & Özer, 2022). Bu yüzden, kent merkezlerindeki hava kalitesini tahmin çalışmaları, hava kirliliğinin kontrolüne ve insan sağlığı üzerine etkilerinin önlenmesine yönelik erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesinde hayati bir rol oynamaktadır.

Günümüzde hava kirleticilerinin tahmin edilmesi için birçok istatistiksel ve matematiksel yöntemden yararlanılmaktadır. Bunlara bütünlük otoregresif hareketli ortalama (ARIMA), mevsimsel bütünlük otoregresif hareketli ortalama (SARIMA), çoklu doğrusal regresyon (MLR), yapay sinir

ağları (ANN), destek vektör makineleri (SVM), uzun kısa süreli bellek (LSTM), çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (MARS) ve aşırı gradyan artırma (XGBoost) gibi geleneksel veya yeni yöntemler örnek gösterilebilir (Cujia ve ark., 2019; Maleki ve ark., 2019; Wu & Lin, 2019; Leong ve ark., 2020; Gopu ve ark., 2021; Shams ve ark., 2021; Tırınk & Öztürk, 2022). Bu yöntemler, genellikle kaotik ve durağan olmayan bir yapıya sahip olan hava kirliliği parametrelerinin öngörülmesinde yetersiz kalmaktadırlar. Birçok çevresel ve içsel durumdan etkilenen hava kalitesindeki anlık ve beklenmedik değişimleri çoğu zaman yansıtamazlar (Zhang & Xia, 2022). ARIMA modelinin doğrusallık varsayımı ve yapay zekâ tabanlı modellerin “kara kutu” doğası kullanıcı müdahalesini sınırlar ve tahmin çalışmaları yüksek hata payı ile sonuçlanır (Wang ve ark., 2016). Bu yüzden, son yıllarda yapılan tahmin çalışmalarında dalgacık dönüşümü (WT), ampirik mod ayrışması (EMD) ve varyasyonel mod ayrışması (VMD) gibi zaman serilerini daha durağan serilere dönüştüren yenilikçi metotlardan faydalanılmaktadır. PM<sub>10</sub> tahmininde MODWT-ARIMA modeli kullanılan bir çalışmada geleneksel ARIMA modeline göre RMSE miktarında %90 azalma bildirilmiştir (Aladağ, 2021). PM<sub>10</sub> için SARIMA ile yapılan başka bir çalışmada %83 tahmin başarısı elde edilmiştir (Cujia ve ark., 2019). Hava kalite endeksi tahmini için önerilen VMD-SE-LSTM ile %87 tahmin performansı sağlanmıştır (Wu & Lin, 2019). EMD-SVR kullanılan başka bir çalışmada ise ARIMA modeline göre RMSE değerinin 208.6’dan 24.5’e kadar düştüğü rapor edilmiştir (Zhu ve ark., 2017).

Bu çalışmada hava kirleticilerinin tahmini için EMD algoritmasının ve ARIMA modelinin bir arada kullanıldığı yeni bir melez model geliştirilmiştir. Van kentindeki 2019-2020 kış mevsiminde ölçülen günlük PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının geleneksel DES, ARIMA ve önerilen EMD-ARIMA melez yöntemi ile tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanı olarak seçilen Van şehir merkezinin yüksek râkımdaki dağlarla çevrili coğrafik yapısı ve karasal iklim şartları nedeniyle özellikle sert geçen kış aylarında yoğun hava kirliliği yaşanmaktadır. Kentteki hava kalitesini olumsuz etkileyen başlıca kaynaklar arasında az gelişmiş sanayiden ziyade evsel ısınma ve yoğun trafik yer almaktadır (Öztürk & Bayram, 2019). 2020 yılında SO<sub>2</sub> ortalaması (22 µg/m<sup>3</sup>) en yüksek beşinci ildir ve yıllık PM<sub>10</sub> ortalaması (40 µg/m<sup>3</sup>) ise DSÖ tarafından belirlenen yıllık sınır değer (20 µg/m<sup>3</sup>) iki katıdır (THHP, 2021). Önerilen melez modelin uygulanabilmesi için öncelikle yüksek frekanslı ve durağan olmayan hava kirletici serileri EMD algoritması kullanılarak daha düşük frekanslı ve durağan alt zaman serilerine ayrıştırılmıştır. Daha sonra her bir alt IMF ve kalıntı serilerine yapılan ADF birim kök testi, ACF ve PACF analizlerine göre ARIMA modelleri oluşturulmuştur. Ardından tahmin edilen alt IMF serileri ve kalıntı serisi birleştirilerek hava kirleticilerinin günlük tahminleri gerçekleştirilmiştir. EMD-ARIMA melez yönteminin tahmin kabiliyeti, geleneksel DES ve ARIMA yöntemleri ile MAE, MAPE, RMSE ve R<sup>2</sup> performans ölçütlerine göre kıyaslanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

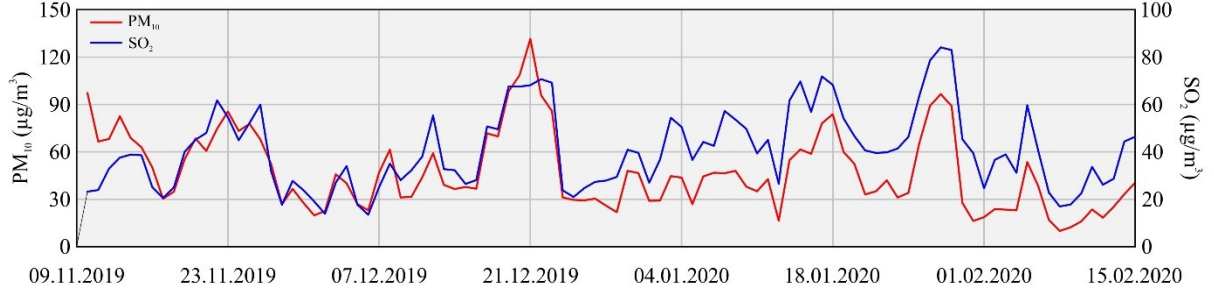
Bu bölümde çalışma alanı ve kullanılan verilerin kısa tanıtımı, ayrıştırma algoritması, geleneksel tahmin yöntemleri ve önerilen melez tahmin modeli ile ilgili gerekli tanımlara, açıklamalara ve tahmin modellerinin performans ölçütlerine yer verilmektedir.

### 2.1. Uygulama alanı ve veri toplama

Türkiye’nin Doğu Anadolu Bölgesinde yer alan Van ili, yaklaşık 1 milyon 150 bin kişinin yaşadığı bölgenin en kalabalık şehir merkezine ev sahipliği yapmaktadır. İl nüfusunun %54’ü Tuşba, İpekyolu ve Edremit merkez ilçelerinde yaşamaktadır. Şehrin kalbi sayılan Cumhuriyet-Bahçıvan ve Ali Paşa-Hafızıye hatları nüfus, trafik ve yapı yoğunluğu açısından en yoğun alanlardır (Bilik, 2021). Karasal iklim şartlarının hâkim olduğu ilde kış ayları karlı ve soğuk, yaz ayları ise kuru ve sıcaktır. Şahbağı, Musakent ve Erek dağlarıyla çevreli, 1730 râkımdaki şehir merkezinin batısında yer alan Van gölünün etkisiyle sıcaklık ve nem bölgeye göre nispeten daha yüksektir.

Van ilinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına ait bir adet hava kalitesi izleme istasyonu bulunmaktadır. Merkezi konumdaki ölçüm istasyonu ısınma ve trafik kaynaklı hava kirliliğini büyük ölçüde yansıtmaktadır. Bu istasyonda ölçülen saatlik PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> konsantrasyon değerleri (µg/m<sup>3</sup>), Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağında (<http://www.havaizleme.gov.tr>) yayınlanmaktadır (ÇŞİDB, 2022). Çalışmada, 10 Kasım 2019 ile 15 Şubat 2020 tarihleri arasındaki günlük ortalama PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> miktarları kullanılmıştır. Şekil 1’de hava kirleticilerinin zaman serilerine yer verilmiştir. PM<sub>10</sub>

için 37 gün HKDYY tarafından belirlenen sınır değerini ( $>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) üzerinde ölçüm yapılmıştır ve  $\text{SO}_2$  için ise çalışma süresi boyunca sınır değeri ( $>125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) aşılmamıştır (HKDYY, 2008).



Şekil 1.  $\text{PM}_{10}$  ve  $\text{SO}_2$  hava kirleticilerinin zaman serileri.

Çizelge 1'deki hava kirleticilerin betimleyici istatistiklerine göre  $\text{PM}_{10}$  ve  $\text{SO}_2$  için ortalama değerler, sırasıyla,  $47.67$  ve  $40.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak hesaplanmıştır. En düşük  $\text{PM}_{10}$  değeri, 8 Şubat 2020 tarihinde  $9.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ve  $\text{SO}_2$  değeri, 6 Aralık 2019 tarihinde  $13.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak ölçülmüştür. En yüksek  $\text{PM}_{10}$  miktarı, 21 Aralık 2019'da  $131.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ve  $\text{SO}_2$  miktarı, 28 Ocak 2020'de  $84.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak ölçülmüştür. Her iki veri seti de hafifçe sola çarpıktır ve biraz basıktır. Zaman serilerinde sıklıkla tercih edilen Jarque-Bera normallik testine göre iki zaman serisi de normallik varsayımını ( $p < 0.05$ ) reddeder (Ruchiraset & Tantrakarnapa, 2022).

Çizelge 1. Hava kirleticilerinin betimleyici istatistikleri

Seriler	Minimum	Maksimum	Medyan	Ortalama	Std. sapma	Aralık	Çarpıklık	Basıklık
$\text{PM}_{10}$	9.92	131.51	42.36	47.67	24.62	121.59	0.90	0.46
$\text{SO}_2$	13.49	84.11	39.15	40.77	16.57	70.62	0.61	-0.27

## 2.2. Tahmin yöntemleri

### 2.2.1. Çift üstel düzeltme (DES)

Üstel düzeltme hem deterministik hem de stokastik eğilime sahip olan tüm zaman serileri için uygulanabilen bir tahmin yöntemidir. Açık, anlaşılır ve şeffaf olmasının yanı sıra birçok farklı duruma başarı ile uyum sağlayabilmesi nedeniyle en sık kullanılan tahmin metodlarından birisidir (Yağimli & Ergin, 2017). Genellikle kısa vadeli tahminler için tercih edilir ve uzun vadeli tahminler için güvenilir olmayabilir. Hem basit ortalama hem de ağırlıklı hareketli ortalama yönteminin avantajlarına sahip olan üstel düzeltme, geçmiş kayıtların etki derecesini zayıflatır ama bu verilerden de tamamen vazgeçmez (Huang ve ark., 2012). Başka bir deyişle, yeni verilere daha fazla ağırlık verilirken önceki verilere üstel olarak azalan ağırlıklar verilir. Üstel düzeltme yönteminin temel eşitliği (Eşitlik 1) aşağıda gösterilmektedir.

$$S_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)S_{t-1} \quad (1)$$

$S_t$ ,  $t$  dönemindeki tahmin edilen değeri,  $y_t$ ,  $t$  dönemindeki gerçek değeri,  $S_{t-1}$ ,  $t-1$  dönemindeki tahmin edilen değeri ve  $\alpha$  düzeltme faktörünü ( $0 < \alpha < 1$ ) temsil eder.

Zaman serisinin eğilim ve mevsimsellik göstermediği durumlarda basit üstel düzeltme uygulanabilir. Tahmin eşitliğine (Eşitlik 2) aşağıda yer verilmiştir.

$$\hat{y}_{t+1} = \alpha y_t + (1 - \alpha)\hat{y}_t \quad (2)$$

Üstel düzeltme, eğilime sahip olan zaman serilerinde de tahmin yapılabilmesi için genişletilmiştir (Holt, 2004). Çift üstel düzeltme olarak ifade edilen bu yöntem, bir tahmin eşitliği (Eşitlik 3) ile seviye (Eşitlik 4) ve eğilim (Eşitlik 5) olmak üzere iki düzeltme eşitliği içerir. Bu eşitlikler aşağıdaki gibidir.

$$\hat{y}_{t+h} = l_t + hb_t \quad (3)$$

$$l_t = (1 - \alpha)l_{t-1} + \alpha x_t \quad (4)$$

$$b_t = (1 - \beta)b_{t-1} + \beta(l_t - l_{t-1}) \quad (5)$$

Burada  $l_t$ ,  $t$  dönemindeki tahmin edilen seviyeyi,  $b_t$ ,  $t$  dönemindeki tahmin edilen eğilimi ve  $h$  tahmin adımını gösterir.  $\beta$  ise eğilim ( $0 < \beta < 1$ ) için düzeltme faktörüdür.

## 2.2.2. Bütünleşik otoregresif hareketli ortalama (ARIMA)

ARIMA, zaman serilerini tahmin etmek için otoregresyon ve hareketli ortalama modellerinin bir arada uygulandığı genelleştirilmiş bir yöntemdir. Otoregresyon modelinin (AR) derecesi  $p$ , hareketli ortalama modelinin (MA) derecesi  $q$  ve zaman serisini durağan hale getirmek için uygulanan fark alma işleminin (I) sayısı ise  $d$  ile ifade edilir (Box ve ark., 2015). Genel olarak ARIMA ( $p, d, q$ ) modeline ait eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$(1 - u)^d Y_t = \alpha + \phi_1 Y_{t-1} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (6)$$

Burada  $\phi_i$  ve  $\theta_i$  sırasıyla AR ve MA katsayılarını,  $u$  fark alma operatörünü,  $Y_t$  zaman serisini ve  $\varepsilon_t$  hata terimini göstermektedir.

ARIMA ile tahmin aşamasına geçilmeden önce zaman serilerinde önemli bir özellik olan durağanlığın mutlaka kontrol edilmesi gerekir. Bunun için serinin gecikmeli değerleri ile hesaplanan Genişletilmiş Dickey-Fuller (ADF) birim kök testi sıklıkla tercih edilmektedir. ADF birim kök testinde,  $t$ -istatistiğinin kritik değerlerden daha büyük olması, sıfır hipotezini reddederek birim kökün olmadığını göstermektedir (Zhang ve ark., 2018). Zaman serisinde birim kök olması durumunda ise ARIMA modelinin önemli bir varsayımı olan durağanlık sağlanana kadar fark işlemi uygulanmalıdır. Bir diğer yöntem ise eğer zaman serisi için uygunsa (yani sıfır veya negatif sayı içermiyorsa) logaritma almaktır. Daha sonra durağanlaştırılan zaman serisinde, AR ( $p$ ) ve MA ( $q$ ) modellerinde değişkenin önceki dönemlerle olan ilişkisinin saptanabilmesi için kullanılan otokorelasyon fonksiyonu (ACF) ve kısmi otokorelasyon fonksiyonu (PACF) incelenerek  $p$  ve  $q$  değerleri seçilir. Farklı derecelerdeki ARIMA ( $p, d, q$ ) modellerinin göreceli olarak performansını belirlemek için genellikle Akaike bilgi kriterinden (AIC) faydalanılır (Cheng ve ark., 2019). Ayrıca Bayesci bilgi kriteri (BIC), Schwarz-Bayesci kriteri (SBC) veya Schwarz bilgi kriteri (SIC) de model kıyaslaması için kullanılabilir. Aşağıdaki eşitlik (Eşitlik 7) ile hesaplanan AIC değerinin daha küçük olması, modelin daha uygun olduğunu göstermektedir (Aladağ, 2021).

$$AIC = 2(p + q + k + 1) - 2 \log(L) \quad (7)$$

Eşitlikte,  $L$  modeli için olabilirlik fonksiyonunun maksimum değerini ve  $k$  ise modelde tahmin edilen parametre sayısını ifade etmektedir.

## 2.3. Ampirik mod ayırıştırma (EMD)

EMD, doğrusal ve durağan olmayan karmaşık zaman serilerini durağan olana kadar ayırıştırmak için uygulanan bir algoritmadır (Huang ve ark., 1998). EMD yöntemi ile orijinal zaman serisi, Hilbert-Huang dönüşümü ile belirli sayıdaki nispeten durağan olan içsel mod fonksiyonuna (IMF) ve bir kalıntı serisine ayrıştırılır. İçsel mod fonksiyonlarının iki şartı sağlanması gerekir. Bunlar: 1) Tüm veri kümesinde yerel ekstremumların ve sıfır geçişlerinin sayısı eşit olmalı veya en fazla bir noktada farklılık göstermelidir ve 2) Herhangi bir noktada yerel maksimumlar ve minimumlar tarafından tanımlanan zarfın ortalaması sıfır olmalıdır (Liu ve ark., 2021). Bir zaman serisi için uygulanan EMD algoritmasının adımlarına aşağıda yer verilmiştir.

1. Orijinal zaman serisinin ( $y_t$ ) yerel maksimum ve yerel minimum değerleri belirlenir.
2. Yerel maksimum ve yerel minimum noktaları, kübik spline interpolasyon yöntemi ile birleştirilerek üst zarf ( $e_{max,1}$ ) ve alt zarf ( $e_{min,1}$ ) oluşturulur.

3. Üst zarf ve alt zarfın aritmetik ortalaması alınarak ortalama zarf ( $e_{ort,1}$ ) hesaplanır.
4. Orijinal seriden ortalama zarf değerleri çıkarılarak fark serisi ( $d_t$ ) bulunur.
5. Eğer fark serisi bir IMF ise, bir içsel mod fonksiyonu ( $c_t$ ) olarak tanımlanır, değilse fark serisi yeni orijinal seri olarak kabul edilir ve IMF olana kadar ilk dört adım tekrarlanır.
6. IMF bulunduktan sonra bu seri, orijinal seriden çıkarılarak kalıntı serisi ( $r_t$ ) elde edilir.
7. Kalıntı serisi, yeni orijinal seri olarak kabul edilir ve ilk altı adım tekrarlanır. Kalıntı serisi, monotonik bir fonksiyon olduğunda veya daha fazla IMF bileşeni elde edilemeyince EMD algoritması bitirilir.

Eşitlik 8’de gösterildiği gibi EMD algoritmasından sonra elde edilen IMF serilerinin ve kalıntı serisinin toplamı orijinal zaman serisine eşittir.

$$y_t = \sum_{i=1}^n IMF_i + r_n \quad (8)$$

Burada  $n$  toplam IMF serisinin sayısını ve  $r$  kalıntı bileşenini göstermektedir.

## 2.4. Önerilen melez EMD-ARIMA yöntemi

Hava kirleticilerinin tahmini için önerilen melez EMD-ARIMA modelinin hesaplama adımlarına aşağıda yer verilmiştir.

1. Hava kirleticilerine ait zaman serileri oluşturulur.
2. Zaman serileri, EMD algoritması ile IMF ve kalıntı alt serilerine ayrıştırılır.
3. Alt zaman serilerinin Sample Entropy miktarı hesaplanır ve serilerdeki entropi yeterince azaltılmışsa EMD sonlandırılır.
4. Alt serilere ADF birim kök testi uygulanır ve seriler logaritma ya da fark alma ( $d$ ) işlemi ile durağanlaştırılır.
5. ACF ve PACF analizine göre ARIMA model parametreleri ( $p$  ve  $q$ ) seçilir.
6. Alt serilerin ARIMA modelleri oluşturulur.
7. AIC istatistiğine göre en uygun model parametreleri seçilir.
8. Her bir alt seri için uygun ARIMA modeli ile tahmin yapılır.
9. Tahmini alt seriler birleştirilir.
10. Belirli bir zaman sonraki PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> hava kirleticisi değeri için tahmin gerçekleştirilir.
11. Modelin performansı ölçülerek diğer modeller ile karşılaştırılır.

## 2.5. Performans değerlendirilmesi

Hava kirliliği tahmininde kullanılan modellerin performans ölçümü, korelasyon katsayısı ( $R^2$ ), kök ortalama karesel hata (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) analiz yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan  $R^2$ , RMSE, MAE ve MAPE’ye ait eşitliklere, sırasıyla, Eşitlik 9, Eşitlik 10, Eşitlik 11 ve Eşitlik 12’de yer verilmiştir.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(T_i - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}} \right)^2 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - T_i)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |G_i - T_i| \quad (11)$$

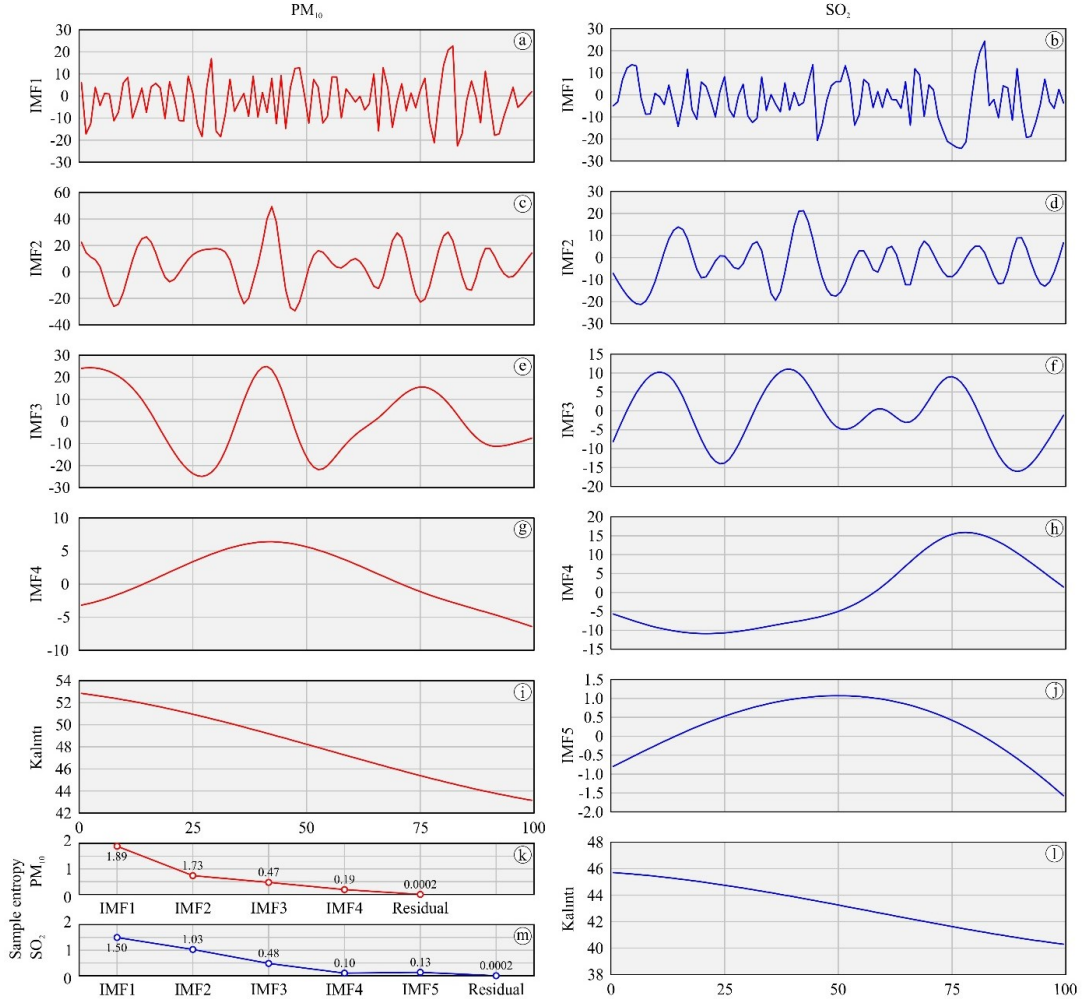


$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{G_i - T_i}{G_i} \right| \times 100 \quad (12)$$

Burada,  $N$  gözlem sayısını,  $G_i$  ve  $T_i$  sırasıyla  $i$  anındaki gözlem ve tahmin değerlerini,  $\bar{G}$  ve  $\bar{T}$  ise sırasıyla gözlem ve tahmin değerlerinin ortalamasını göstermektedir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Önerilen tahmin modelinin uygulanabilmesi için öncelikle  $PM_{10}$  ve  $SO_2$  zaman serilerinin EMD yöntemi ile alt serilere ayrıştırılması gerekir. Şekil 2'de hava kirleticilerinin IMF ve kalıntı serileri gösterilmektedir. Şekil 2(k) ve Şekil 2(m)'de ise ayrıştırılan serilerin Sample Entropy grafikleri görülmektedir. Sample Entropy (SE), bir zaman serisinin karmaşıklığını gösterir (Ma ve ark., 2020). Her iki grafikte de açıkça görüldüğü gibi en yüksek SE değerleri, IMF<sub>1</sub> serilerindedir ve seriler ayrıştıkça entropi miktarları azalır.  $PM_{10}$  ve  $SO_2$  zaman serileri için EMD algoritması ile elde edilen kalıntı serilerinin SE değerleri sıfıra çok yakındır. Dolayısıyla  $PM_{10}$  ve  $SO_2$  zaman serileri için sırasıyla 4 ve 5 adet IMF ayrışmasının yeterli olduğu görülmektedir. Çizelge 2'de IMF ve kalıntı serilerine ait betimleyici istatistiklere yer verilmiştir.



Şekil 2.  $PM_{10}$  ve  $SO_2$  zaman serilerinin ampirik mod ayrışımı.



Çizelge 2. IMF ve kalıntı serilerinin betimleyici istatistikleri

Alt seriler	Minimum	Maksimum	Medyan	Ortalama	Std. sapma	Aralık	Çarpıklık	Basıklık
PM <sub>10</sub> .IMF <sub>1</sub>	-20.85	24.51	0.36	-0.09	9.78	45.36	0.03	-0.54
PM <sub>10</sub> .IMF <sub>2</sub>	-34.30	44.41	1.22	-0.10	15.90	78.70	-0.04	-0.12
PM <sub>10</sub> .IMF <sub>3</sub>	-25.30	24.53	-1.11	0.08	15.08	49.83	0.06	-1.22
PM <sub>10</sub> .IMF <sub>4</sub>	-7.42	5.40	0.02	-0.04	3.87	12.82	-0.14	-1.25
PM <sub>10</sub> .Kalıntı	42.82	52.51	47.89	47.81	3.05	9.62	-0.06	-1.34
SO <sub>2</sub> .IMF <sub>1</sub>	-22.56	26.03	-1.44	-0.64	9.90	48.59	-0.03	-0.15
SO <sub>2</sub> .IMF <sub>2</sub>	-19.18	23.33	-1.21	-0.94	9.46	42.51	0.21	-0.28
SO <sub>2</sub> .IMF <sub>3</sub>	-15.15	11.93	-0.25	-0.21	7.81	27.07	-0.22	-0.95
SO <sub>2</sub> .IMF <sub>4</sub>	-12.44	14.33	-6.55	-2.05	9.55	26.77	0.50	-1.34
SO <sub>2</sub> .IMF <sub>5</sub>	-1.53	1.11	0.52	0.33	0.72	2.64	-0.77	-0.42
SO <sub>2</sub> .Kalıntı	41.41	46.83	44.37	44.29	1.71	5.41	-0.11	-1.33

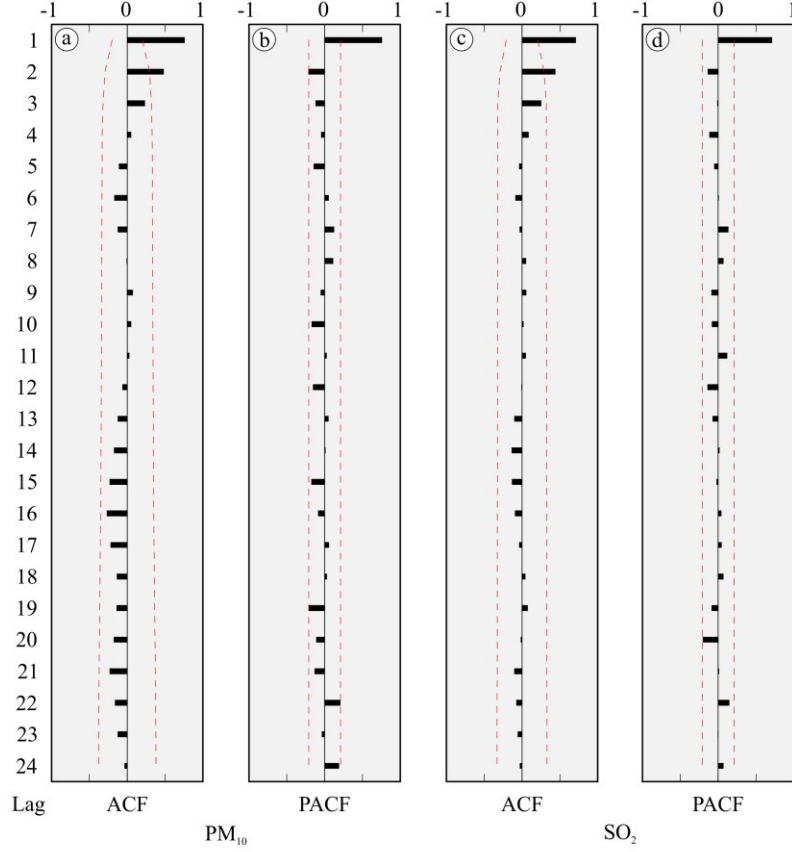
Bir zaman serisinde ARIMA ile tutarlı bir tahmin modeli oluşturabilmek için serinin durağan olması gerekir. Durağan olmayan zaman serileri fark alma ve/veya logaritma gibi işlemlerle durağanlaştırılır. ADF testi, zaman serilerinin durağanlığını belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Çizelge 3'te PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> zaman serilerinin ve birinci dereceden farklarının ( $d = 1$ ) ADF testleri gösterilmektedir. Burada, sabit terimli ve doğrusal eğilimli ADF testi ve terimsiz ADF testi sonuçlarına göre her iki zaman serisinde de birim kök bulunmaktadır. Birinci dereceden farklarında ise birim kök yoktur ve seriler durağandır. Dolayısıyla PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> serilerinin ARIMA modellerinde  $d$  değeri 1 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3. ADF testi

	ADF test	PM <sub>10</sub>	$d(\text{PM}_{10}, 1)$	SO <sub>2</sub>	$d(\text{SO}_2, 1)$
Sabit terimli	<i>t</i> -stat	-3.94	-9.29	-4.03	-9.88
	1%	-3.50	-3.50	-3.50	-3.50
	5%	-2.89	-2.89	-2.89	-2.89
	10%	-2.58	-2.58	-2.58	-2.58
	<i>p</i> -değeri	0.00	0.00	0.00	0.00
	Birim kök	yok	yok	yok	yok
	Sabit terimli ve doğrusal eğilimli	<i>t</i> -stat	-4.00	-9.23	-4.06
1%		-4.06	-4.06	-4.06	-4.06
5%		-3.46	-3.46	-3.46	-3.46
10%		-3.15	-3.15	-3.15	-3.15
<i>p</i> -değeri		0.01	0.00	0.01	0.00
Birim kök		<b>var</b>	yok	<b>var</b>	yok
Terimsiz		<i>t</i> -stat	-2.03	-9.34	-1.25
	1%	-2.59	-2.59	-2.59	-2.59
	5%	-1.94	-1.94	-1.94	-1.94
	10%	-1.61	-1.61	-1.61	-1.61
	<i>p</i> -değeri	0.04	0.00	0.19	0.00
	Birim kök	<b>var</b>	yok	<b>var</b>	yok

ARIMA modelinde AR ( $p$ ) ve MA ( $q$ ) bileşenlerindeki  $p$  ve  $q$  parametrelerinin belirlenebilmesi için ACF ve PACF analizleri yapılmıştır. PACF ve ACF testlerinde güven aralığının dışındaki gecikme sayısına göre sırasıyla  $p$  ve  $q$  değerleri seçilir. Şekil 3'te PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> zaman serilerinin birinci dereceden farklarının ACF ve PACF grafiklerine yer verilmiştir. Her iki zaman serisinde  $p$  değeri PACF sonucuna göre 1 ve  $q$  değeri ACF sonucuna göre 2 seçilmiştir. Ayrıca her iki parametre için üçüncü dereceye

kadar ARIMA modelleri oluşturulmuş ve AIC değerleri incelenmiştir. Çizelge 4'te  $PM_{10}$  ve  $SO_2$  hava kirlleticilerinin tahmin edilmesi için kurulan geleneksel ARIMA modellerinin AIC istatistiği gösterilmektedir. ARIMA parametreleri en düşük AIC değerine göre belirlenmiştir. Burada  $PM_{10}$  için en uygun ARIMA ( $p, q, d$ ) modeli 2, 1, 1 ve  $SO_2$  için en uygun model parametreleri 1, 1, 1 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.  $PM_{10}$  ve  $SO_2$  zaman serilerinin ACF ve PACF grafikleri.

Çizelge 4. ARIMA ( $p, q, d$ ) modellerinin AIC istatistiği

$PM_{10}$	AIC	$SO_2$	AIC
2, 1, 1	822.81	1, 1, 1	760.27
1, 1, 2	823.44	1, 1, 2	760.96
3, 1, 1	824.50	2, 1, 1	760.99
1, 1, 3	824.70	1, 1, 3	762.80
2, 1, 2	825.35	2, 1, 2	762.92
2, 1, 3	826.50	2, 1, 3	764.96
3, 1, 3	828.59	3, 1, 3	767.38
0, 1, 0	828.83	0, 1, 0	767.95
0, 1, 3	830.30	0, 1, 3	768.06
0, 1, 1	830.44	0, 1, 2	768.75
1, 1, 0	830.50	2, 1, 0	769.90
2, 1, 0	831.76	0, 1, 1	769.91
0, 1, 2	831.93	1, 1, 0	769.93
1, 1, 1	832.36	3, 1, 0	771.80
3, 1, 0	832.69	3, 1, 1	773.83
3, 1, 2	833.37	3, 1, 2	775.90

Önerilen EMD-ARIMA yönteminde de her bir IMF ve kalıntı serisi geleneksel ARIMA modeline benzer şekilde oluşturulmuştur. EMD ile elde edilen alt serilerin durağanlık analizleri, ACF, PACF ve AIC sonuçlarına göre Çizelge 5'te gösterilen  $p$ ,  $d$  ve  $q$  değerleri seçilmiştir. Daha sonra EMD-ARIMA modeli ile hava kirleticilerinin tahmin edilmesi için tahmin edilen IMF ve kalıntı alt serileri birleştirilmiştir.

Çizelge 5. EMD serileri için seçilen ARIMA ( $p$ ,  $q$ ,  $d$ ) parametreleri

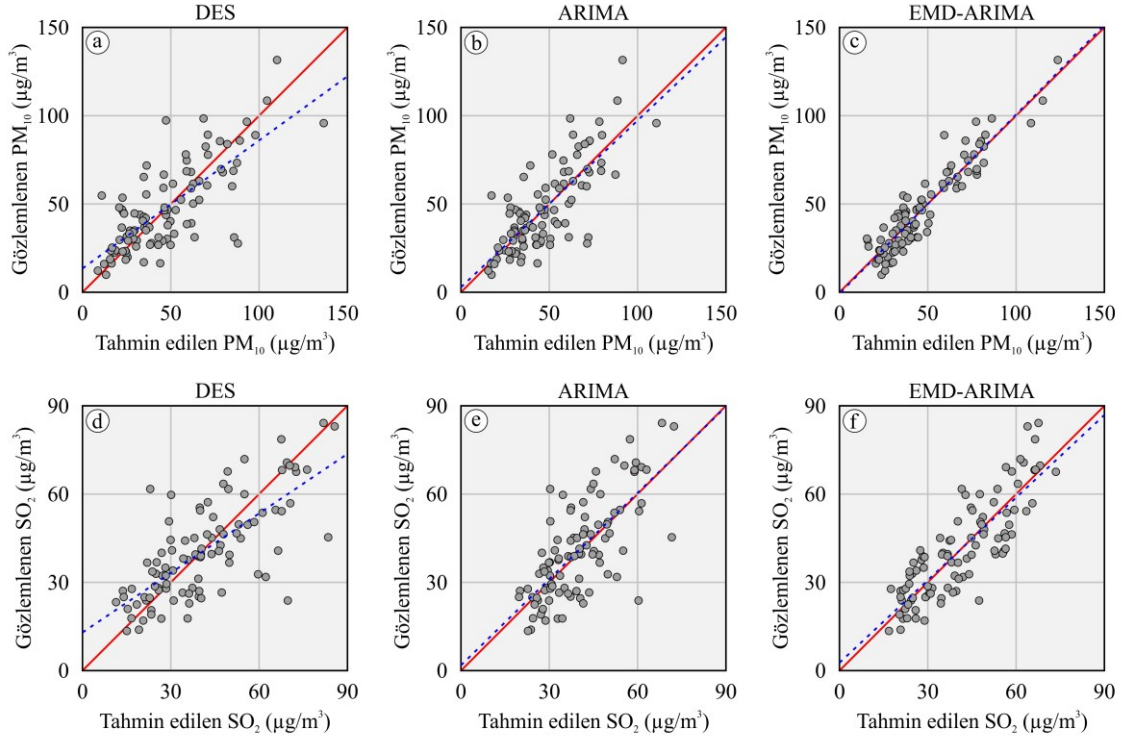
Hava kirleticileri	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	IMF <sub>3</sub>	IMF <sub>4</sub>	IMF <sub>5</sub>	Kalıntı
PM <sub>10</sub>	3, 0, 0	2, 0, 5	2, 1, 4	5, 1, 2	-	3, 1, 5
SO <sub>2</sub>	0, 0, 1	3, 0, 2	2, 0, 4	5, 1, 0	2, 1, 0	4, 1, 3

Çizelge 6'da DES, ARIMA ve EMD-ARIMA modellerinin tahmin performanslarına yer verilmiştir. DES modelinde  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları, sırasıyla, PM<sub>10</sub> için 1.17575 ve 0.01432, SO<sub>2</sub> için 1.19898 ve 0.00803 olarak hesaplanmıştır. En yüksek MAE değerleri sırasıyla DES ve ARIMA modellerinde ölçülürken en düşük MAE değeri ise EMD-ARIMA modelinde PM<sub>10</sub> için 7.25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ve SO<sub>2</sub> için 7.58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak elde edilmiştir. En yüksek MAPE değeri, DES modelinde PM<sub>10</sub> için %31.15 ve SO<sub>2</sub> için %25.96 ve en düşük EMD-ARIMA modelinde sırasıyla, %20.58 ve %20.73 olarak hesaplanmıştır. En düşük RMSE değeri de diğer performans ölçütlerine benzer biçimde önerilen EMD-ARIMA modelinde elde edilmiştir. RMSE hata miktarı, PM<sub>10</sub> için ARIMA modeline kıyasla %49.97 ve SO<sub>2</sub> için %29.5 azalmıştır. Hava kalitesi endeksi tahmini için VMD ile kullanılarak ayırıştırma yapılan LSTM modelinde MAE, MAPE ve RMSE için sırasıyla %11.97 %9.09 ve %15.10 oranlarında performans artışı bildirilmiştir (Wu & Lin, 2019). Aylık PM<sub>10</sub> tahmininde WT-ARIMA ile ARIMA modeline göre RMSE değeri 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'den 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'e kadar azalmıştır (Aladağ, 2021).

Çizelge 6. DES, ARIMA ve EMD-ARIMA tahmin modellerinin performans sonuçları

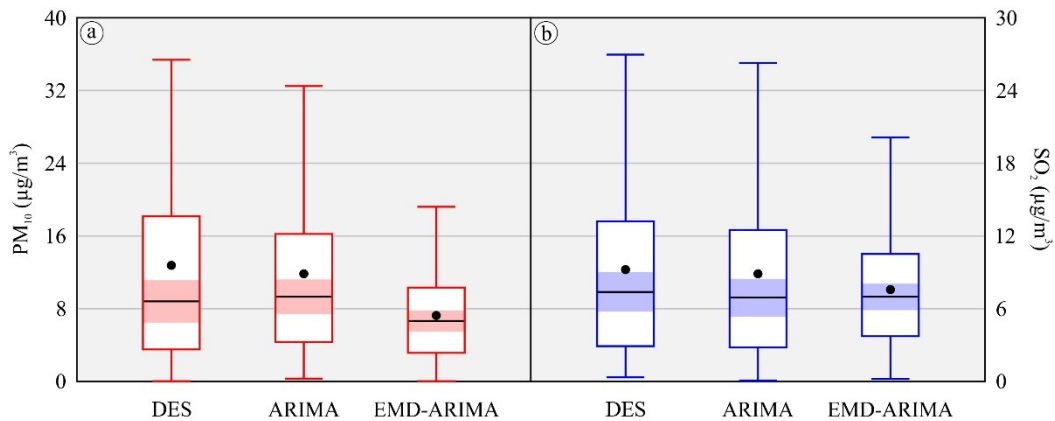
Parametre	Model adı	MAE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	MAPE (%)	RMSE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	R <sup>2</sup>
PM <sub>10</sub>	DES	12.77	31.15	17.67	0.56
	ARIMA	11.84	29.68	15.49	0.59
	EMD-ARIMA	7.25	20.58	8.84	0.87
SO <sub>2</sub>	DES	9.22	25.96	12.71	0.53
	ARIMA	8.87	25.02	11.52	0.51
	EMD-ARIMA	7.58	20.73	8.96	0.71

Şekil 4'te DES, ARIMA ve EMD-ARIMA modellerinden elde edilen değerler ile gözlemlenen değerler arasındaki korelasyon grafikleri gösterilmektedir. Grafiklerdeki kırmızı düz çizgiler mükemmel korelasyonu ( $R^2 = 1$ ) ve kesikli mavi çizgi ise örneklemin ölçülen korelasyonunu göstermektedir. En yüksek R<sup>2</sup> değerleri, EMD-ARIMA modelinde PM<sub>10</sub> için 0.87 ve SO<sub>2</sub> için 0.71 olarak hesaplanmıştır. En düşük R<sup>2</sup> değerleri ise PM<sub>10</sub> için sırasıyla DES ve ARIMA, SO<sub>2</sub> için sırasıyla ARIMA ve DES modellerinde elde edilmiştir. Ayrıca her iki modelde de özellikle orta ve yüksek değerlerdeki hata miktarı belirgin bir şekilde artmaktadır. EMD-ARIMA modelinde ise yüksek değerlerde PM<sub>10</sub>'a göre SO<sub>2</sub> zaman serisinde daha fazla sapma gözlemlenmiştir. Yıllık PM<sub>2.5</sub> tahmini yapılan bir çalışmada cdEMD-SVM-ARIMA melez modelinde R<sup>2</sup> değeri 0.84 olarak hesaplanmıştır (Zhang & Xia, 2022). Tahran'daki SO<sub>2</sub> miktarının öngörülmesinde kullanılan MLP modeli ile 0.9 R<sup>2</sup> değeri elde edilmiştir (Shams ve ark., 2021).



Şekil 4. DES, ARIMA ve EMD-ARIMA tahmin modellerinin korelasyon grafikleri.

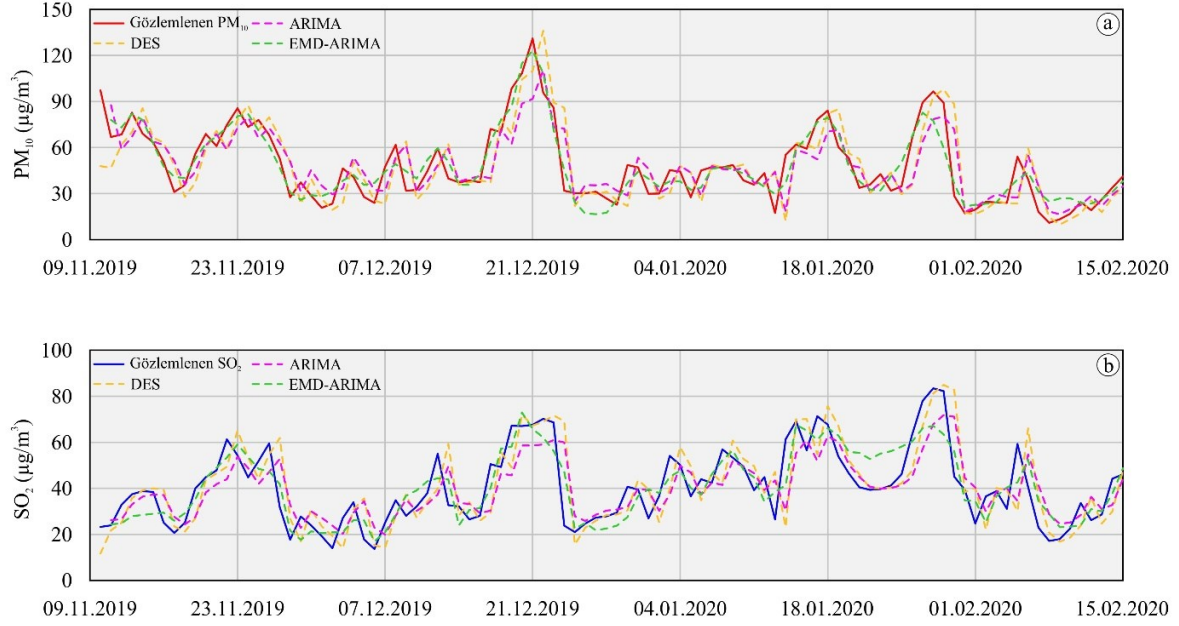
Şekil 5'te DES, ARIMA ve EMD-ARIMA modellerinden elde edilen tahmin değerleri ile gözlemlenen değerler arasındaki hata miktarlarının (solda) PM<sub>10</sub> ve (sağda) SO<sub>2</sub> için kutucuk grafikleri gösterilmektedir. Kutucuk grafiği bir seri hakkında aynı anda birçok bilginin bir arada görülmesine imkân tanır. Kutucukların ucundaki yatay eksene paralel aşağı ve yukarı yönlü çizgiler, sırasıyla, aykırı değerler dışında kalan en yüksek ve en düşük değerleri gösterir. Kutucuğun alt ve üst kenarları ise sırasıyla hata miktarının yüzde yirmi beşlik (ilk çeyrek) ve yetmiş beşlik (üçüncü çeyrek) kısmını ifade eder. Kutucuğun içindeki yatay eksene paralel çizgi ortanca değeri ve kalın nokta ortalama değeri gösterir. Buna göre her iki hava kirleticisi için EMD-ARIMA yönteminden elde edilen hata miktarındaki değişim oranları ve ortalamaları DES ve geleneksel ARIMA modellerine kıyasla daha azdır.



Şekil 5. DES, ARIMA ve EMD-ARIMA model hatalarının kutucuk grafikleri.

Şekil 6'da hava kirleticilerinin gözlemlenen değerleri ve tahmin modellerinin uyum grafiklerine yer verilmiştir. DES ve ARIMA modellerinde hava kirleticilerinin uç (pik) değerlerinde kaymalar görülmektedir ve gecikmeli bir düzelme söz konusudur. EMD-ARIMA modelinde ise PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> miktarlarındaki değişimler daha az kayma ile yakalanmıştır. Bu durum, EMD algoritmasından elde

edilen alt serilerin belirli bir hareketi takip etme doğasından kaynaklanır ve ARIMA modelinin doğrusal tahmin yeteneğinin sonuçlarla örtüşmesiyle açıklanabilir (Zhu ve ark., 2017).



Şekil 6. DES, ARIMA ve EMD-ARIMA modellerinin gözlemlenen değerlerle uyumu.

Hava kirliliği tahmin modellerinin değerlendirilebilmesi için bir diğer önemli ölçüt de günlük hava kalite endeksinin doğru aralıkta tahmin edilebilmesidir. Hava kalite endeksi (AQI), atmosferik kirlleticilerin insan sağlığı üzerine etkilerine göre sınıflandırılmasını sağlar. PM<sub>10</sub> için 0-54 µg/m<sup>3</sup> arası “iyi”, 55-154 µg/m<sup>3</sup> arası ise “orta” ve SO<sub>2</sub> için 0-35 µg/m<sup>3</sup> arası “iyi”, 36-75 µg/m<sup>3</sup> arası “orta”, 76-185 µg/m<sup>3</sup> arası “sağlıksız” AQI seviyesine işaret eder (EPA, 2022). Çalışma süresi boyunca hava kirleticisi verileri daha üst seviyelere ulaşmadığı için AQI karşılıklarına burada yer verilmemiştir. PM<sub>10</sub> konsantrasyonuna göre toplam 33 gün orta seviyede AQI gözlemlenmiştir. Bu günler için DES ve ARIMA modelleri ile 25 gün, EMD-ARIMA modeliyle ise 29 gün doğru tahmin yapılmıştır. SO<sub>2</sub> konsantrasyonuna göre toplam 57 gün orta ve 3 gün sağlıksız AQI seviyesine ulaşılmıştır. Orta AQI için DES ile 19 gün, ARIMA ile 14 gün ve EMD-ARIMA modeli ile 23 gün doğru tahmin yapılmıştır. Sağlıksız AQI görülen günleri ise üç model de doğru tahmin etmeyi başaramamıştır.

#### 4. Sonuç

Hava kirliliği yaşam kalitesini olumsuz yönde etkileyen önemli çevresel bileşenlerden birisidir. Düşük hava kalitesinin gözlemlendiği kent merkezlerinde, hava kirliliğine bağlı solunum yolu rahatsızlıklarında kayda değer bir artış meydana gelir ve toplum sağlığı bu durumdan olumsuz etkilenir. Hava kirliliğinin öngörülmesi, atmosferik kirleticilerin salınımının önlenmesinde ve halk sağlığına olası etkilerinin azaltılmasında kilit rol oynamaktadır. Hava kirleticilerine ait zaman serileri genellikle durağan olmayan kaotik bir yapıdadır. Bu yüzden hava kirliliği için tutarlı tahminlerde bulunmak oldukça zordur. Geleneksel tahmin modelleri, hava kirleticilerindeki beklenmedik artışların öngörülmesinde çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada bu sorunun üstesinden gelmek için EMD algoritmasını ve ARIMA tahmin yöntemini içeren melez bir yaklaşım olan EMD-ARIMA modeli önerilmiştir.

Türkiye'nin Van şehir merkezindeki hava kirliliği gözlem istasyonundan toplanan 2019-2020 kış dönemine ait PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> verileri, önerilen EMD-ARIMA melez modelinin tahmin becerisinin ölçülebilmesi için kullanılmıştır. Önerilen melez model, DES ve geleneksel ARIMA modelleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek tahmin hassasiyetine sahiptir. EMD-ARIMA modeli ile MAE, MAPE, RMSE ve R<sup>2</sup> performans ölçütlerine göre PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> için sırasıyla 7.25 µg/m<sup>3</sup>, %20.58, 8.84 µg/m<sup>3</sup>, 0.87 ve 7.58 µg/m<sup>3</sup>, %20.73, 8.96 µg/m<sup>3</sup>, 0.71 sonuçları elde edilmiştir. Ampirik bulgular, zaman

serilerini daha düşük frekanslı ve nispeten daha durağan alt serilere ayırıştırarak EMD algoritması ile ARIMA modelinin birleştirilmesinin hava kirletici miktarlarındaki değişimlerin öngörülmesinde uygun bir melez yöntem olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu nedenle, EMD-ARIMA yöntemi, hava kirliliği kontrolü ve yönetimi için etkili ve basit bir araç olarak uygulanabilir. Gelecekteki çalışmalarda, diğer hava kirleticilerini de ele alan bölgenin topografik yapısını, demografik özelliklerini ve mevsimsel değişimlerini kapsayan daha geniş ölçekli hava kirliliği tahmin teorilerinin geliştirilmesi beklenmektedir.

## Kaynakça

- Akbostancı, E., Türüt-Aşık, S., & Tunç, G. İ. (2009). The relationship between income and environment in Turkey: is there an environmental Kuznets curve?. *Energy policy*, 37(3), 861-867. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.088
- Aladağ, E. (2023). The influence of meteorological factors on air quality in the province of Van, Turkey. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(4), 259. doi:10.1007/s11270-023-06265-0
- Aladağ, E. (2021). Forecasting of particulate matter with a hybrid ARIMA model based on wavelet transformation and seasonal adjustment. *Urban Climate*, 39, 100930. doi:10.1016/j.uclim.2021.100930
- Alkan, A. (2018). Hava kirliliğinin ciddi boyutlara ulaştığı kentlere bir örnek: Siirt. *Bitlis Eren Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(2), 641-666.
- Bayram, H. (2005). Türkiye’de hava kirliliği sorunu: Nedenleri, alınan önlemler ve mevcut durum. *Toraks Dergisi*, 6(2), 159-165.
- Bilik, M. B. (2021). Deprem tehlikelerine karşı Van kent merkezinin sosyo-mekansal zarar görebilirliği. *Resilience*, 5(1), 67-92. doi:10.32569/resilience.886414
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons.
- Cheng, Y., Zhang, H., Liu, Z., Chen, L., & Wang, P. (2019). Hybrid algorithm for short-term forecasting of PM<sub>2.5</sub> in China. *Atmospheric Environment*, 200, 264-279. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.12.025
- Cujia, A., Agudelo-Castañeda, D., Pacheco-Bustos, C., & Teixeira, E. C. (2019). Forecast of PM<sub>10</sub> time-series data: A study case in Caribbean cities. *Atmospheric Pollution Research*, 10(6), 2053-2062. doi:10.1016/j.apr.2019.09.013
- ÇŞİDB. (2022). *Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı*. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <http://www.havaizleme.gov.tr> Erişim tarihi: 11.10.2022.
- Elbir, T., Müezzinoğlu, A., & Bayram, A. (2000). Evaluation of some air pollution indicators in Turkey. *Environment International*, 26(1-2), 5-10. doi: 10.1016/S0160-4120(00)00071-4
- EPA. (2022). *Air quality index (AQI) basics*. Çevre Koruma Ajansı. <https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi> Erişim tarihi: 03.12.2022.
- Gautam, D., & Bolia, N. B. (2020). Air pollution: Impact and interventions. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13(2), 209-223. doi:10.1007/s11869-019-00784-8
- Gopu, P., Panda, R. R., & Nagwani, N. K. (2021). *Time series analysis using ARIMA model for air pollution prediction in Hyderabad city of India*. 3rd International Conference on Soft Computing and Signal Processing, Hyderabad. doi:10.1007/978-981-33-6912-2\_5
- Güzel, Ş., & Özer, P. (2022). Türkiye’de hava kirliliği ve sağlık harcamaları. *Sağlık ve Sosyal Refah Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 186-202. doi:10.55050/sarad.1138629
- Hao, Y., Peng, H., Temulun, T., Liu, L.-Q., Mao, J., Lu, Z.-N., & Chen, H. (2018). How harmful is air pollution to economic development? New evidence from PM<sub>2.5</sub> concentrations of Chinese cities. *Journal of Cleaner Production*, 172, 743-757. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.195
- HKDYY. (2008, 6 Haziran). T. C. Başbakanlık, Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. *Resmi Gazete (Sayı: 26898)*. Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=12188&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Holt, C. C. (2004). Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International Journal of Forecasting*, 20(1), 5-10. doi:10.1016/j.ijforecast.2003.09.015
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., ... & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time



- series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903-995. doi:10.1098/rspa.1998.0193
- Huang, J., Li, C., & Yu, J. (2012). *Resource prediction based on double exponential smoothing in cloud computing*. 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, Yichang. doi:10.1109/CECNet.2012.6201461
- Kurt, A., & Oktay, A. B. (2010). Forecasting air pollutant indicator levels with geographic models 3 days in advance using neural networks. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7986-7992. doi:10.1016/j.eswa.2010.05.093
- Leong, W. C., Kelani, R. O., & Ahmad, Z. (2020). Prediction of air pollution index (API) using support vector machine (SVM). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103208. doi:10.1016/j.jece.2019.103208
- Levy, H., Horowitz, L. W., Schwarzkopf, M. D., Ming, Y., Golaz, J.-C., Naik, V., & Ramaswamy, V. (2013). The roles of aerosol direct and indirect effects in past and future climate change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), 4521-4532. doi:10.1002/jgrd.50192
- Liu, M.-D., Ding, L., & Bai, Y.-L. (2021). Application of hybrid model based on empirical mode decomposition, novel recurrent neural networks and the ARIMA to wind speed prediction. *Energy Conversion and Management*, 233, 113917. doi:10.1016/j.enconman.2021.113917
- Ma, Z., Chen, H., Wang, J., Yang, X., Yan, R., Jia, J., & Xu, W. (2020). Application of hybrid model based on double decomposition, error correction and deep learning in short-term wind speed prediction. *Energy Conversion and Management*, 205, 112345. doi:10.1016/j.enconman.2019.112345
- Maleki, H., Sorooshian, A., Goudarzi, G., Baboli, Z., Tahmasebi Birgani, Y., & Rahmati, M. (2019). Air pollution prediction by using an artificial neural network model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(6), 1341-1352. doi:10.1007/s10098-019-01709-w
- Mujtaba, G., & Shahzad, S. J. H. (2021). Air pollutants, economic growth and public health: Implications for sustainable development in OECD countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 12686-12698. doi:10.1007/s11356-020-11212-1
- Murray, C. J., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasi-Kangevari, M., Abd-Allah, F., Abdelalim, A., Abdollahi, M., & Abdollahpour, I. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10258), 1223-1249. doi:10.1016/S0140-6736(20)30752-2
- Ostro, B., Malig, B., Broadwin, R., Basu, R., Gold, E. B., Bromberger, J. T., ... & Green, R. (2014). Chronic PM<sub>2.5</sub> exposure and inflammation: Determining sensitive subgroups in mid-life women. *Environmental Research*, 132, 168-175. doi:10.1016/j.envres.2014.03.042
- Öztürk, D., & Bayram, T. (2019). Van ili kent merkezinde hava kirliliği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 1142-1153. doi:10.17798/bitlisfen.529099
- Quah, E., & Boon, T. L. (2003). The economic cost of particulate air pollution on health in Singapore. *Journal of Asian Economics*, 14(1), 73-90. doi:10.1016/S1049-0078(02)00240-3
- Ruchiraset, A., & Tantrakarnapa, K. (2022). Association of climate factors and air pollutants with pneumonia incidence in Lampang province, Thailand: Findings from a 12-year longitudinal study. *International Journal of Environmental Health Research*, 32(3), 691-700. doi:10.1080/09603123.2020.1793919
- Shams, S. R., Jahani, A., Kalantary, S., Moeinaddini, M., & Khorasani, N. (2021). The evaluation on artificial neural networks (ANN) and multiple linear regressions (MLR) models for predicting SO<sub>2</sub> concentration. *Urban Climate*, 37, 100837. doi:10.1016/j.uclim.2021.100837
- Sheng, N., & Tang, U. W. (2016). The first official city ranking by air quality in China—A review and analysis. *Cities*, 51, 139-149. doi:10.1016/j.cities.2015.08.012
- Sümer, G. Ç. (2014). Hava kirliliği kontrolü: Türkiye’de hava kirliliğini önlemeye yönelik yasal düzenlemelerin ve örgütlenmelerin incelenmesi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 13, 37-56. doi:10.18092/ulikidince.232135
- THHP. (2021). *Kara Rapor: Hava kirliliği ve sağlığa etkileri*. Temiz Hava Hakkı Platformu. <https://www.temizhavahakki.org/wp-content/uploads/2021/09/KaraRapor2021.pdf> Erişim tarihi: 21.11.2022.

- Tırınk, S., & Öztürk, B. (2022). Evaluation of PM<sub>10</sub> concentration by using Mars and XGBOOST algorithms in Iğdır Province of Türkiye. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 5349–5358. doi:10.1007/s13762-022-04511-2
- Varaprasad, V., Kanawade, V., & Narayana, A. (2021). Spatio-temporal variability of near-surface air pollutants at four distinct geographical locations in Andhra Pradesh State of India. *Environmental Pollution*, 268, 115899. doi:10.1016/j.envpol.2020.115899
- Volna, V., Blažek, Z., & Krejčí, B. (2021). Assessment of air pollution by PM<sub>10</sub> suspended particles in the urban agglomeration of Central Europe in the period from 2001 to 2018. *Urban Climate*, 39, 100959. doi:10.1016/j.uclim.2021.100959
- Wang, H., Liu, L., Dong, S., Qian, Z., & Wei, H. (2016). A novel work zone short-term vehicle-type specific traffic speed prediction model through the hybrid EMD–ARIMA framework. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 4(3), 159-186. doi:10.1080/21680566.2015.1060582
- WHO. (2022). *Ambient (outdoor) air pollution*. Dünya Sağlık Örgütü. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) Erişim tarihi: 03.12.2022.
- Wu, Q., & Lin, H. (2019). Daily urban air quality index forecasting based on variational mode decomposition, sample entropy and LSTM neural network. *Sustainable Cities and Society*, 50, 101657. doi:10.1016/j.scs.2019.101657
- Yağımlı, M., & Ergin, H. (2017). Türkiye’de iş kazalarının üssel düzeltme metodu ile tahmin edilmesi. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 29(4), 118-123. doi:10.7240/marufbd.305236
- Zeydan, Ö., & Pekkaya, M. (2021). Evaluating air quality monitoring stations in Turkey by using multi criteria decision making. *Atmospheric Pollution Research*, 12(5), 101046. doi:10.1016/j.apr.2021.03.009
- Zhang, L., Lin, J., Qiu, R., Hu, X., Zhang, H., Chen, Q., ... & Wang, J. (2018). Trend analysis and forecast of PM<sub>2.5</sub> in Fuzhou, China using the ARIMA model. *Ecological Indicators*, 95, 702-710. doi:10.1016/j.ecolind.2018.08.032
- Zhang, Z., & Xia, D. (2022). An improved PM<sub>2.5</sub> forecasting method based on correlation denoising and ensemble learning strategy. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 8641–8654. doi:10.1007/s13762-022-04525-w
- Zhu, S., Lian, X., Liu, H., Hu, J., Wang, Y., & Che, J. (2017). Daily air quality index forecasting with hybrid models: A case in China. *Environmental Pollution*, 231, 1232-1244. doi:10.1016/j.envpol.2017.08.069



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Katı Faz Mikroekstraksiyon-Gaz Kromatografisi Metodu ile Malonaldehit ve Hegzanal Tayini

Tahir YÜCEL, İsa CAVİDOĞLU\*

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye  
Tahir YÜCEL, ORCID No: 0000-0003-0688-9499, İsa CAVİDOĞLU, ORCID No: 0000-0001-7896-5871  
\*Sorumlu yazar e-posta: isacavidoglu@yyu.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 07.12.2022  
Kabul: 10.03.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1215854

#### Anahtar Kelimeler

Ekstraksiyon,  
Hegzanal,  
Katı faz mikroekstraksiyon,  
Malonaldehit

**Öz:** Bu çalışmada, ayçiçeği yağında Katı faz mikroekstraksiyon (SPME) tekniği ile ekstraksiyon süresi (20, 30 ve 40 dakika) ve sıcaklığının (40, 50 ve 60 °C) hegzanal (HE) ve malonaldehit (MA) ekstraksiyonu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. HE ve MA'nın kantitatif analizi için İç Standart (IS) olarak 5-Metil 2-hegzanon (500 ppb) kullanılmıştır. HE ve MA'nın IS ile aralarındaki ilişkinin düzeyini belirlemek için ayçiçeği yağına farklı oranlarda HE ve MA (5 ppb, 10 ppb, 50 ppb, 100 ppb, 0.5 ppm, 1 ppm, 5 ppm ve 10 ppm) ve IS (500 ppb) eklenmiştir. Değişkenler arasındaki ilişki, regresyon denklemi ( $y = mx + n$ ) ve değişkenler ( $x = HE$  veya  $MA$ 'nın derişimi/ $IS$ 'nin derişimi;  $y = HE$  veya  $MA$ 'nın alanı/ $IS$ 'nin alanı) arasındaki regresyon katsayılarının ( $R^2$ ) belirlenmesi ile değerlendirilmiştir.  $MA$  polar ve reaktif olduğu için  $MA$  ile  $IS$  arasındaki  $R^2$  değeri ( $0.015 < R^2 < 0.606$ ) oldukça düşük bulunmuş ve  $MA$ 'nın nicel analizi için bu yöntemin uygun olmadığı tespit edilmiştir.  $HE$  ile  $IS$  arasındaki  $R^2$  göz önüne alındığında  $HE$ 'nin analizi için en uygun ekstraksiyon sıcaklığı ve süresinin 60 °C ve 20 dakika olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, hızlı ve çözücü gerektirmeyen bir yöntem olan SPME'nin,  $HE$ 'in ayçiçeği yağında tespitinde kullanılabilirken,  $MA$ 'nın tespit edilebilmesi için SPME yöntemi ile saptanabileceği türevlerine dönüştürülmesi gerektiği saptanmıştır.

### Quantification of Malonaldehyde and Hexanal by Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography Method

#### Article Info

Received: 07.12.2022  
Accepted: 10.03.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1215854

#### Keywords

Extraction,  
Hexanal,  
Malonaldehyde,  
Solid phase microextraction

**Abstract:** In the present study, the effects of extraction time (20, 30 and 40 minutes) and temperature (40, 50 and 60 °C) on the extraction of hexanal (HE) and malonaldehyde (MA) in sunflower oil with Solid Phase Micro-extraction technique (SPME) were investigated. For the quantification of HE and MA, 5-Methyl 2-hexanone (500 ppb) was added as Internal Standard (IS). In order to determine the level of relationship between HE and MA with IS, different ratios of HE and MA (5 ppb, 10 ppb, 50 ppb, 100 ppb, 0.5 ppm, 1 ppm, 5 ppm and 10 ppm) and IS (500 ppb) were added to sunflower oil. The relationship between the variables was evaluated by the regression equation ( $y = mx + n$ ) and the determination of the correlation coefficients ( $R^2$ ) between the variables ( $x=HE$  or  $MA$  concentration/ $IS$  concentration;  $y = HE$  or  $MA$  area/ $IS$  area). Because of the high reactivity and polarity of  $MA$ , the correlation between  $MA$  and  $IS$  was not sufficient ( $0.015 < R^2 < 0.606$ ) to explain the linearity between  $MA$  and  $IS$  in the sunflower oil. Considering the  $R^2$  values between  $HE$  and  $IS$ , it was determined that the optimum extraction temperature and time for the analysis of  $HE$  was 60 °C and 20 minutes. As a result, SPME which is a fast and solvent-free technique, can be used in the determination of  $HE$  in sunflower oil, while for determination of  $MA$ , it must be derivatized for analysis by SPME.

## 1. Giriş

Gıdalardaki oksidasyon süreci; ısı ve ışık gibi bir enerji kaynağı, yağ asidi bileşimi, oksijen çeşidi, metal, pigment, fosfolipid, antioksidan vb. minör bileşenler gibi unsurların varlığında meydana gelen kompleks bir olaydır. Oksidasyon başlangıç, ilerleme ve sonlanma olmak üzere üç basamaktan oluşur ve süreç sonunda hidroperoksitler ve uçucu bileşenler meydana gelmektedir (Choe & Min, 2006).

Hidroperoksitlerin parçalanması sonucunda önemli oranda aldehitler oluşmaktadır. Aldehitler gıdada hoşta gitmeyen tat ve kokuların oluşmasından sorumludurlar. HE (hegzanal), MA (malonaldehit), pentanal, propanal ve 4-hidroksi nonenal yaygın olarak oluşan aldehitlerdir. HE ve propanal, gıdalarda lipid oksidasyonunun bir göstergesi olarak kullanılmaktadırlar. HE ve propanal çift bağ içermemelerinden dolayı doymamış aldehitlere göre daha stabildirler. Özellikle HE başta olmak üzere oksidatif stabilitenin ve tadın kabul edilebilirliğinin bir göstergesi olarak ve ayrıca gıdalardaki yağ oksidasyonunun düzeyini belirlemek için kullanılmaktadır (Mariutti ve ark., 2009; Pignoli ve ark., 2009; Bak ve ark., 2020).

MA, omega-3 ve omega-6 yağ asitlerinin oksidasyonu sonucu oluşan karakteristik bir aldehittir (Vandemoortele ve ark., 2021). MA lipid oksidasyonunun ve özellikle et ve et ürünleri gibi çeşitli gıdalardaki acılaşmanın bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Elverişsiz depolama koşulları altında uzun depolama sürecinde ransit tat ve kokular oluşabilmektedir (Fan, 2002; Shin, 2009; Shin & Jung, 2009; Ruan ve ark., 2014).

Gıdalardaki oksidasyon durumunu tespit etmek için peroksit, anisidin, konjuge-dien ve -trien, toplam oksidasyon ve 2-tiyobarbütirik asit reaktif maddeler (TBARS) değerleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların arasında TBARS diğer yöntemlere göre kısmen kolay ve hızlı bir yöntemdir. Ancak TBARS değeri spesifik ve duyarlı bir analiz olmadığı için geniş ölçekte tartışılmaktadır. TBARS analizinde diğer oksidasyon ürünleri veya lipid oksidasyonu ile ilişkili olmayan bileşenler tiyobarbütirik asit ile reaksiyona girebildiklerinden dolayı lipid oksidasyonunun düzeyi olması gereken değerden daha fazla çıkabilmektedir (Ma ve ark., 2014). HE, ayçiçeği yağının başlıca yağ asidi olan linoleik asidin oksidasyonu sonucu oluşan bir aldehittir (Camiletti ve ark., 2023). HE yağların oksidasyonu sonucu oluşan esas uçucu bileşenlerden biridir. Lipit oksidasyon sürecini ve pişmiş gıdalardaki istenmeyen lezzet bileşenlerinin oluşumunu gözlemlemek için son zamanlarda sıkça kullanılmaktadır (Brunton ve ark., 2000; Panseri ve ark., 2011; Ma ve ark., 2014; Xu ve ark., 2023).

Genel olarak analiz yöntemleri örnek alma (örneğin toplanması), örnek hazırlama, ayırma, saptama ve data analizi gibi işlemleri içermektedir (Vas & Vekely, 2004; Jalili ve ark., 2020). Yapılan araştırmalarda analiz süresinin önemli bir bölümünü örnek toplama ve örnek hazırlamaya ayırmak gerekmektedir. Enstrümantal cihazların örnek matriksinden doğrudan analiz yapamamasından dolayı bu süre gereklidir. Günümüzde çözücü kullanılarak yapılan örnek hazırlama işlemleri (sıvı-sıvı ekstraksiyon teknikleri) zaman alıcı, yoğun emek ve çok aşamalı işlemleri gerektirmektedir. Ancak analiz aşamaların artması, hata ve kayıplara neden olur. Sıvı-sıvı ekstraksiyon yöntemi yüksek oranda çözücü kullanılmasını gerektirmektedir. Atık çözücülerin imhası analiz maliyetini arttırmakla beraber çevreyi kirletmekte ve laboratuvarında çalışanlar için sağlık riskleri teşkil etmektedir. Katı faz ekstraksiyon kartuşu kullanmak klasik sıvı-sıvı ekstraksiyon yönteminin yol açtığı kısıtlamaları azaltmaktadır. Kartuş kullanılarak uygulanan katı faz ekstraksiyonunda daha az çözücüye gereksinim duyulmasına rağmen sıvı-sıvı ekstraksiyonda olduğu gibi zaman alıcı ve çok aşamalı işlemleri gerektirmekte ve yoğunlaştırma aşamasında uçucu bileşenlerde kayıp söz konusu olmaktadır (Vas & Vekely, 2004).

Günümüzde örnek hazırlamada pratik bir metot olan SPME yöntemi sıkça uygulanmaktadır. SPME tekniği, sıvı-sıvı ekstraksiyonu ve katı faz ekstraksiyonunun dezavantajlarını gidermek üzere tasarlanmıştır. SPME; çözücü kullanmadan örnekleme, ekstraksiyon ve yoğunlaştırma gibi birçok adımı birleştirmektedir. Örnek içindeki analitler doğrudan fiber ile ekstrakte edilip yoğunlaşması sağlanmaktadır. Bu yöntem, örnek hazırlamada zamandan ve atıkların bertaraf edilmesi maliyetinden tasarruf sağlamaktadır. SPME genellikle Gaz Kromatografisi (GC) ve GC/Kütle Spektroskopisi (MS) ile kombinasyon olarak kullanılmaktadır. Özellikle çevresel, biyolojik ve gıda örneklerindeki uçucu ve yarı uçucu bileşenlerin ekstraksiyonunda kullanılabilirliktedir. SPME ayrıca uçuculuğu düşük olan ve



termal olarak bozulan bileşenleri analiz etmek için Yüksek Performans Sıvı Kromatografisi (HPLC) ile kombine olarak kullanılmaktadır (Vas & Vekely, 2004; Pawliszyn, 2012; Jalili ve ark., 2020).

SPME tekniği; kullanılan fiber kaplamanın çeşidi, fiber kaplamanın kalınlığı, ekstraksiyon süre ve sıcaklığı, örnek hacmi, karıştırma, tuz ekleme ve pH gibi pek çok faktörden etkilenmektedir (Prosen & Kralj, 1999; Spietelun ve ark., 2013; Dadalı & Elmacı, 2019). Ekstraksiyonun süre ve sıcaklığı, işlemin etkinliğini belirleyen temel parametrelerdir. Sıcaklık, ekstraksiyona iki şekilde etkilemektedir. Sıcaklığın artışıyla fazlar arasındaki kütle transferi hızlanırken aynı zamanda dağılım katsayısı da düşmektedir. Dolayısıyla sıcaklık değişimi en çok tepe boşluğu ekstraksiyon tekniğinde uygulanmaktadır. Çünkü sıcaklığın artmasıyla birlikte bileşenlerin örnekten tepe boşluğuna aktarım hızı artmaktadır (Prosen & Kralj, 1999; Pawliszyn, 2012; Spietelun ve ark., 2013). Ekstraksiyon süresi; sıcaklık, bileşenin dağılım katsayısı ve karıştırma gibi birkaç faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bileşenler maksimum sorbsiyona ulaştığında dengeye ulaşılmaktadır. Dengeye ulaşmak için gereken süre genellikle uzundur ve şiddetli karıştırma ile bu süre kısaltılmaktadır. Karıştırma doğrudan ekstraksiyon yönteminde önemli bir parametredir (Prosen & Kralj, 1999; Spietelun ve ark., 2013).

Fan (2002),  $\gamma$ -ışımına maruz kalmış elma suyundaki MA miktarını GC-MS kullanarak tespit edip, bu yöntemi TBARS testi ile karşılaştırmıştır. GC-MS ile kıyaslandığında TBARS testi ile ölçülen MA miktarı daha yüksek bulunmuştur. Bu durum GC-MS yönteminin TBARS yöntemine kıyasla daha hassas olduğunu göstermiştir. Nzekoue ve ark. (2019) peynirdeki serbest yağ asitleri ve HE'yi tespit etmek için SPME-GC-MS yöntemini uygulamışlardır. Geliştirilen bu yöntemin gıda endüstrisindeki raf ömrü ve kalite kontrolü çalışmalarına katkı sunabileceğini belirtmişlerdir. Maher ve ark. (2015) konvansiyonel sprey kurutucu kullanarak hazırlanan emülsiyon ve nano-emülsiyondaki lipit oksidasyon derecesinin göstergesi olan pentanal ve HE miktarını tespit etmek için SPME-GC yöntemini uygulamışlardır. Ma ve ark. (2014), SPME-GC yöntemi ile yerfıstığı, soya ve zeytin yağı örneklerindeki HE miktarını tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada, yağların oksidasyon düzeyinin göstergesi olarak değerlendirilen HE ve MA'nın miktarı hızlı ve çözücü kullanılmadan uçucu bileşenlerin ekstraksiyonunu sağlayan SPME yöntemi ile saptanması araştırılmıştır. Çalışmada, ayçiçeği yağına farklı oranlarda HE ve MA konularak, IS (5-metil 2-hegzanon) varlığında 3 fazlı SPME fiberin bu bileşenleri ekstrakte etme etkinliği araştırılmıştır. Böylece 3 fazlı SPME fiberi ve GC ile farklı sıcaklık ve süre koşullarında HE ve MA'nın tespit edilebileceği düzeyler araştırılırken, aynı zamanda bu iki bileşenin iç standart olarak kullanılan 5-metil 2-hegzanon ile ilişki düzeyini gösteren denklem ve ilişki katsayıları hesaplanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Materyal

Yapılan çalışmada Van ili piyasasından temin edilen ayçiçeği yağı kullanılmıştır. Ayçiçeği yağı oksidatif stabilize çalışmalarında sıkça kullanılan bir yağ olduğundan dolayı bu çalışmada kullanılmıştır. Çalışmada, yüksek saflıkta ve nitelikte HE (Merck, Germany), MA (Acros Organics, New Jersey, USA) ve IS (Merck, Germany) kullanılmıştır.

### 2.2. Yöntem

Çalışmada HE ve MA'nın kantitatif analizi için iç standart olarak kullanılan 5-metil 2-hegzanon ile ilişkilerini gösteren regresyon denklemi ve regresyon katsayısı belirlenmiştir. Bunun için, ayçiçeği yağına metanolde hazırlanan stok HE ve MA çözeltilerinden daha önce belirlenen derişimler (5 ppb, 10 ppb, 50 ppb, 100 ppb, 500 ppb, 1 ppm, 5 ppm ve 10 ppm) hazırlanarak örneğe konulmuştur. 3 faz DVB/CAR/PDMS (Supelco Co., Bellefonte, PA, USA) SPME fiberi kullanılarak her bir örneğe 3 farklı sıcaklık ve süre uygulanarak SPME fiberinin yapısına alabileceği HE ve MA miktarları saptanmıştır. Çalışmada analiz parametreleri olarak 3 farklı sıcaklık (40, 50 ve 60 °C), 3 farklı süre (20, 30 ve 40 dk) ve 8 farklı derişime 2 tekerrürlü SPME ekstraksiyonu uygulanmıştır.

#### 2.2.1. Hegzanal ve malonaldehit analizi

HE ve MA analizi için 3 fazlı SPME fiberi, ekstraksiyondan önce 1 saat boyunca 250 °C'de GC cihazının enjeksiyon bloğunda koşullandırılmıştır. 2 g yağ örneği 30 ml'lik cam bir vialde tartılmış

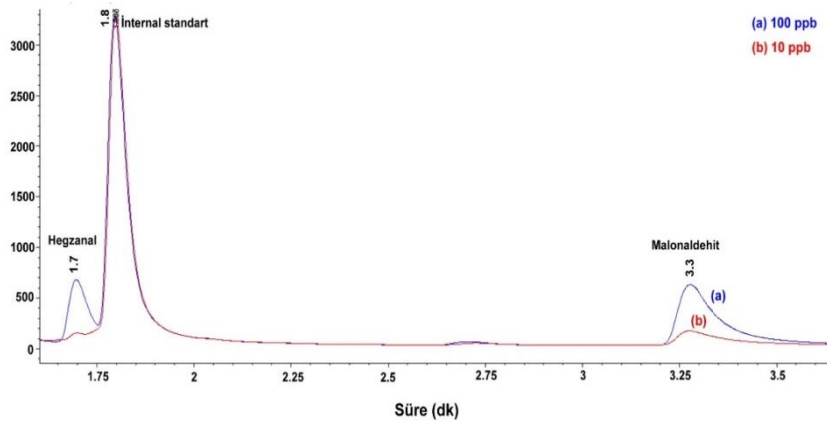
ve örneklere belirlenen oranda HE ve MA ve IS olarak bütün örnekler için sabit miktarda 500 ppb düzeyinde 5-metil-2-hegzanon eklendikten sonra vial dijital olarak sıcaklığı ayarlanabilen bir manyetik karıştırıcıda istenilen sıcaklığa gelmesi için 5 dk boyunca bekletilmiştir. Böylece ortam sıcaklığının istenen değere ulaşması sağlanmıştır. Sonrasında SPME fiberi vialin tepe boşluğuna daldırılarak daha önce belirlenen sıcaklık ve süreyle HE ve MA'nın örnekten tepe boşluğuna oradan da fibere geçmesi sağlanmıştır. Ekstraksiyon sonunda SPME fiberi, dedektör olarak Alev İyonizasyon Dedektörü (FID) bulduran GC cihazına absorbe olan örneklerin desorbe olması için doğrudan enjekte edilmiştir. Bu çalışmada Agilent firmasının 6890N model GC cihazı kullanılmış olup kolon olarak 30m x 0.25mm x 0.25µm boyutlarında HP-INNOWAX seçilmiştir. Gazların akış hızı helyum, hidrojen ve kuru hava için sırasıyla, 40 ml/dk, 40 ml/dk ve 450 ml/dk olarak belirlenmiştir. Enjektör, kolon ve dedektörün sıcaklıkları ise sırasıyla, 200 °C, 140 °C ve 260 °C seçilmiştir. GC ile elde edilen alanlar kullanılarak veriler değerlendirilmiştir. Bunun için MA'nın derişiminin IS'nin derişimine oranı ile MA'nın alanının IS'nin alanına oranı bir grafiğe aktarılarak grafiğin regresyon denklemi ve R<sup>2</sup> değeri her sıcaklık ve süre için hesaplanmıştır. Aynı şekilde HE ve IS arasındaki ilişki de bu şekilde belirlenmiştir. Böylece farklı ekstraksiyon sıcaklığı ve süreleri için elde edilen denklemlerle bilinmeyen bir yağ örneğindeki HE ve MA miktarlarını saptamaya yarayan denklemler türetilmiştir.

### 2.3. Veri analizi

Verilerin analizinde; regresyon denklemleri ve R<sup>2</sup> değerlerini hesaplamak için Microsoft Excel 2010 paket programı kullanılmıştır. R<sup>2</sup>, bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkinin derecesini ve yönünü gösteren katsayıdır. Bu katsayı, (-1) ile (+1) arasında bir değer almaktadır. Eğer; R<sup>2</sup> = 1 ise iki değişken arasında pozitif tam bir ilişki vardır. Korelasyon katsayısı (R<sup>2</sup>) = -1 ise iki değişken arasında negatif tam bir ilişki vardır (Kayaalp & Çankaya, 2008). Verilerin değerlendirilmesinde her bir sıcaklık ve süre parametresi için y = mx + n gibi doğrusal regresyon denklemi türetilmiştir. Burada x bağımsız değişken olup HE veya MA derişiminin IS derişimine oranı olarak ifade edilirken, y bağımlı değişken olup HE veya MA'nın pik alanının IS pik alanına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Böylece uygulanan sıcaklık ve sürelerde ayçiçeği yağında HE ve MA'nın miktarlarını belirlemeye yarayan regresyon denklemleri yukarıda belirtilen parametrelerden (x ve y) yararlanarak türetilmiştir (Javidipour & Qian, 2008).

### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada oksidasyonunun göstergesi olarak değerlendirilen HE ve MA'yı SPME ile ekstrakte ederken sıcaklığın ve sürenin SPME performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Belirlenen parametrelerin SPME performansı üzerine olan etkisini araştırmadan önce HE, MA ve IS'nin geliş sürelerini belirlemek için iki farklı vial kullanılmıştır. Birinci vialde 100 ppb HE, 100 ppb MA ve 500 ppb IS ilave edilirken; ikinci vialde 10 ppb HE, 10 ppb MA ve yine 500 ppb IS ilave edilmiştir. 40 °C'de 30 dk ekstraksiyondan sonra GC'de yapılan analiz sonucunda Şekil 1'deki kromatogramlar elde edilmiştir.

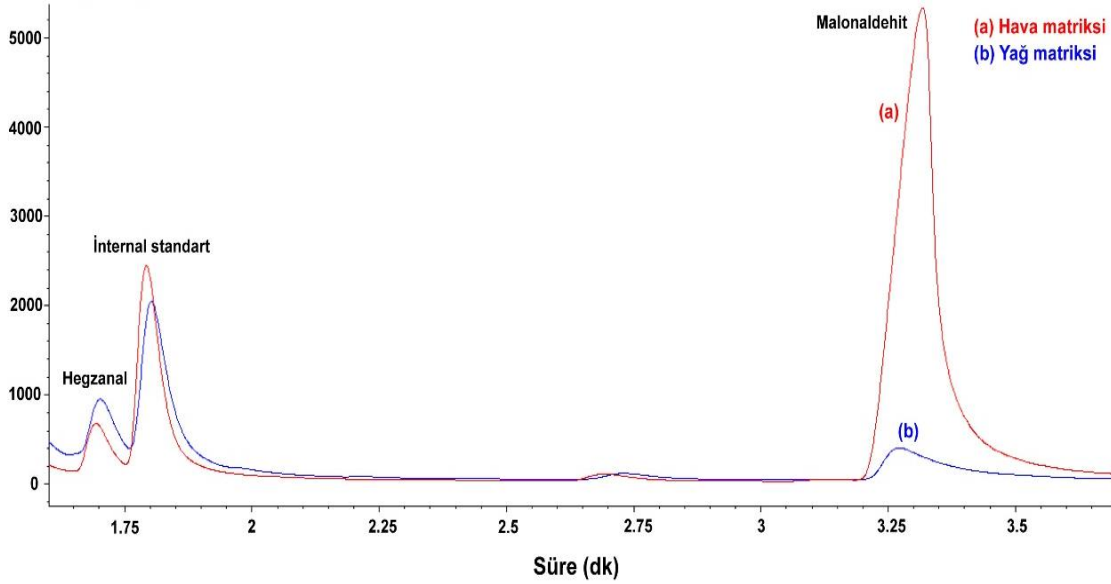


Şekil 1. İki farklı derişimde HE ve MA ile 500 ppb IS ilave edilen örneğe 40 °C'de 30 dk ekstraksiyondan sonra elde edilen GC kromatogramı.



Kromatogramda görüldüğü üzere HE, IS ve MA'nın geliş süreleri sırasıyla, 1.7, 1.8 ve 3.3 dk olarak belirlenmiştir. Kromatograma bakıldığında IS sabit miktarda ilave edildiği için her iki pik de aynı yükseklikte olduğu görülmektedir. HE ve MA'nın derişimlerinin artması ile ilgili piklerin alanında da artış saptanmıştır.

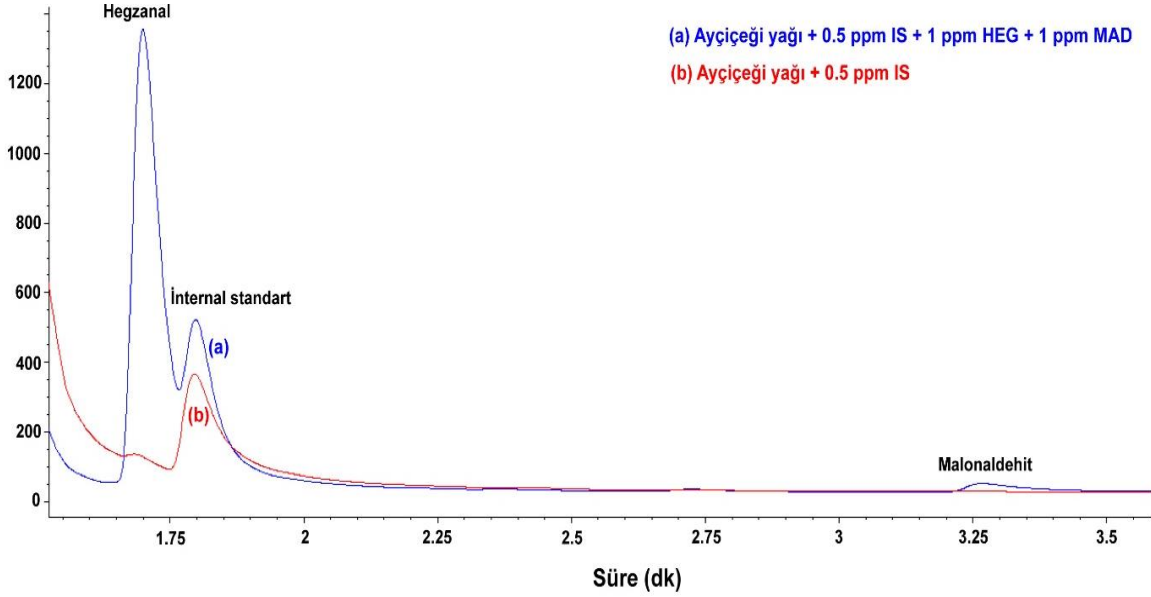
Matriks etkisini araştırmak amacıyla hiçbir madde konulmadan boş vial ve ayçiçeği yağı matriks olarak seçilmiştir. Bu iki ortamda belirlenen derişimlerde farklı süre ve sıcaklıklarda SPME'nin performansı araştırılmıştır. Belirlenen örnek matrikslerine 500 ppb HE, IS ve MA konulmuştur. 40 °C'de 30 dk ekstraksiyondan sonra GC'de Şekil 2'de görülen kromatogram elde edilmiştir.



Şekil 2. 500 ppb HE, IS ve MA ilave edilmiş hava ve yağ matrikslerinde 40 °C ve 30 dk ekstraksiyon sonrasına ait GC kromatogramı.

Şekil 2'deki kromatograma bakıldığında her iki ortamda da IS ve HE'nin pikleri birbirine benzerken, yağ örneğinde MA'nın pikinde çarpıcı biçimde bir düşüş olduğu görülmektedir. Hava ortamında (boş vialde) MA'ya ait pik alanı keskin ve belirgin iken, yağ ortamında MA'nın piki HE ve IS'ye ait piklerden çok daha düşük olduğu saptanmıştır. Bu durum, yağ ortamında bulunan MA'nın 3 faz SPME fiberi tarafından hava ortamı ile karşılaştırıldığında aynı düzeyde ekstrakte edilmediğini ortaya koymaktadır. MA'ya ait pikin hava ve yağ matriksinde benzer davranış göstermemesinin nedeni MA'nın oldukça reaktif ve polar bir bileşen olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden yapılan çalışmaların çoğunda öncelikle MA'nın stabil türevleri oluşturulmuştur. Daha sonra oluşan bu türevler GC ve HPLC gibi kromatografik teknikleri ile analiz edilmiştir. [Fujioka & Shibamoto \(2005\)](#), antioksidan aktivite ölçümü için geliştirmiş oldukları bir çalışmada MA tayininde türevlendirme yapmışlardır. Bunun için MA'yı N-metil hidrazin ile reaksiyona tabi tutmuşlardır. Oluşan 1-metilpirazol türevini SPME ile ekstrakte edip, GC ile MA miktarını saptamışlardır. [Fan \(2002\)](#), elma suyundaki MA miktarını belirlemek için MA'yı pentaflorofenil hidrazin ile türevlendirmiştir. Yine aynı şekilde [Shin \(2009\)](#), insan kanındaki MA miktarını belirlemek için 2,2,2-trifloroetilhidrazin ile MA'yı 50 °C'de 40 dk boyunca türevlendirmiştir.

SPME'nin ayçiçeği yağı matriksindeki performansı araştırılmadan önce ayçiçeği yağının HE ve MA içerip içermediği araştırılmıştır. Diğer bir deyişle ayçiçeği yağının içerisinde dışarıdan eklenen HE ve MA dışında bozulmadan dolayı HE ve MA oluşup oluşmadığı araştırılmıştır. Bunun için bir vialde 2 g yağ ve 500 ppb IS; diğer bir vialde 2 g yağ, 500 ppb IS, 1ppm HE ve 1 ppm MA ilave edilmiştir. 60 °C'de 40 dk boyunca ekstraksiyon yapıldıktan sonra Şekil 3'teki kromatogram elde edilmiştir.



Şekil 3. 60 °C ve 40 dk ekstraksiyon sonucu kontrol örneği ve dışarıdan HE, MA ve IS ilave edilmiş örneklere ait GC kromatogramı.

Şekil 3 incelendiğinde kontrol örneğinde HE ve MA'nın geliş sürelerinin olduğu yerde keskin ve belirgin herhangi bir pik tespit edilmemiştir. Bu da seçilen matrisin HE ve MA içermediğini göstermektedir. SPME ekstraksiyonu sırasında tespit edilecek maddenin miktarında artış olmaması gerekmektedir. Çünkü sıcaklığın ve sürenin etkisiyle aranan madde miktarında artış olursa bu durumda örneğin daha önce bozulduğu yani taze olmadığı anlamına gelir. Bu çalışmada uygulanan azami sıcaklık (60 °C) ve sürelerde (40 dk) HE ve MA bulgusuna rastlanmamıştır (Şekil 3).

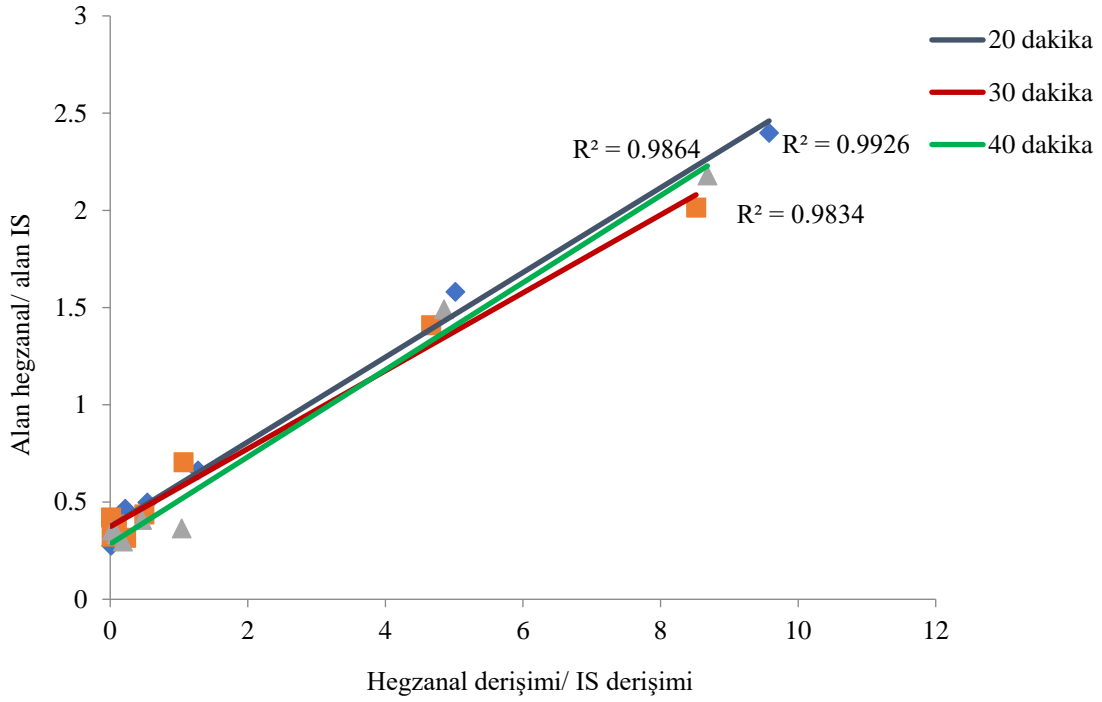
Sonraki aşamada ayçiçeği yağında çeşitli sıcaklık ve sürelerde SPME'nin performansı araştırılarak bu farklı süre ve sıcaklıklarda HE ve MA'nın IS ile olan ilişkilerini gösteren denklemler türetilmiştir. 40 °C'de 20, 30 ve 40 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında HE'nin IS ile olan ilişkisi, regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları Çizelge 1 ve Şekil 4'te verilmiştir. 40 °C'de 20, 30 ve 40 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında elde edilen korelasyon katsayıları sırasıyla 0.992, 0.983 ve 0.986 bulunmuştur. Çizelge 1'deki ve Şekil 4'teki  $R^2$  değerleri incelendiğinde 40°C için en uygun sürenin sırasıyla, 20, 40 ve 30 dk olduğu görülmektedir.

40 °C'de 20, 30 ve 40 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında MA'nın IS ile olan ilişkisini gösteren regresyon denklemleri ve  $R^2$  değerleri Çizelge 1 ve Şekil 5'te gösterilmiştir.

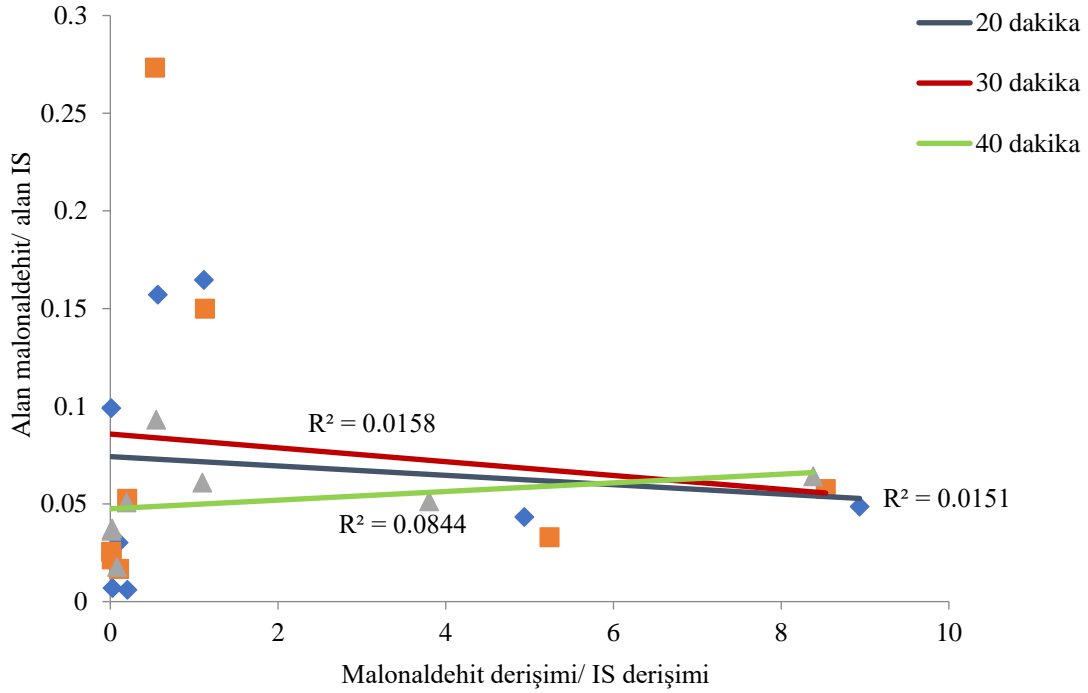
Çizelge 1. 40 °C'de farklı sürelerde ekstraksiyon uygulanmasıyla elde edilen regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları

Bileşen	Süre	Regresyon Denklemi	Korelasyon Katsayısı ( $R^2$ )
HE	20	$y = 0.217x + 0.373$	0.992
	30	$y = 0.200x + 0.373$	0.983
	40	$y = 0.224x + 0.284$	0.986
MA	20	$y = 0.200x + 0.0174$	0.015
	30	$y = 0.003x + 0.085$	0.015
	40	$y = 0.002x - 0.047$	0.084

HE: Hegzanal, MA: Malonaldehit, x: HE veya MA'nın derişimi/IS'nin derişimi; y: HE veya MA'nın alanı/IS'nin alanı



Şekil 4. Ayrıçığı yağında 40 °C'de farklı sürelerde HE ile IS arasındaki derişim ve alan oranları ilişkisi.



Şekil 5. Ayrıçığı yağında 40 °C'de farklı sürelerde MA ile IS arasındaki derişim ve alan oranları ilişkisi.

40 °C'de 20 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında elde edilen korelasyon katsayısı 0.015 olarak bulunmuştur. 30 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında elde edilen korelasyon katsayısı 0.015 olarak tespit edilirken; ekstraksiyon süresi 40 dk olduğunda korelasyon katsayısı 0.084 olarak saptanmıştır. R<sup>2</sup> değerleri dikkate alındığında 40 °C'de üç farklı sürede de MA ve IS arasında doğrusal bir ilişki bulunamamıştır. Bunun nedeni MA'nın polaritesinin ve reaktivitesinin yüksek olmasından

kaynaklanmaktadır. MA'nın bu özelliğinden dolayı türevlendirilmesi gerekmektedir. Literatür bilgilerine bakıldığında yapılan çalışmaların çoğunda MA önce türevlerine dönüştürülmüş daha sonra SPME-GC uygulanarak tespit edilmiştir. [Umamo ve ark. \(1988\)](#), sığır yağı ve mısırözü yağındaki MA'yı tespit etmek için metilhidrazin kullanarak 1-metilpirazole türevlendirmişlerdir. Benzer bir çalışmada [Fujioka & Shibamoto \(2005\)](#), okside olmuş yağlarda MA'yı 1-metilpirazole dönüştürerek SPME-GC'de miktarını tespit etmişlerdir. [Ruan ve ark. \(2014\)](#), etteki MA miktarını tespit etmek için MA'yı pentaflorofenilhidrazin ile türevlendirmişlerdir.

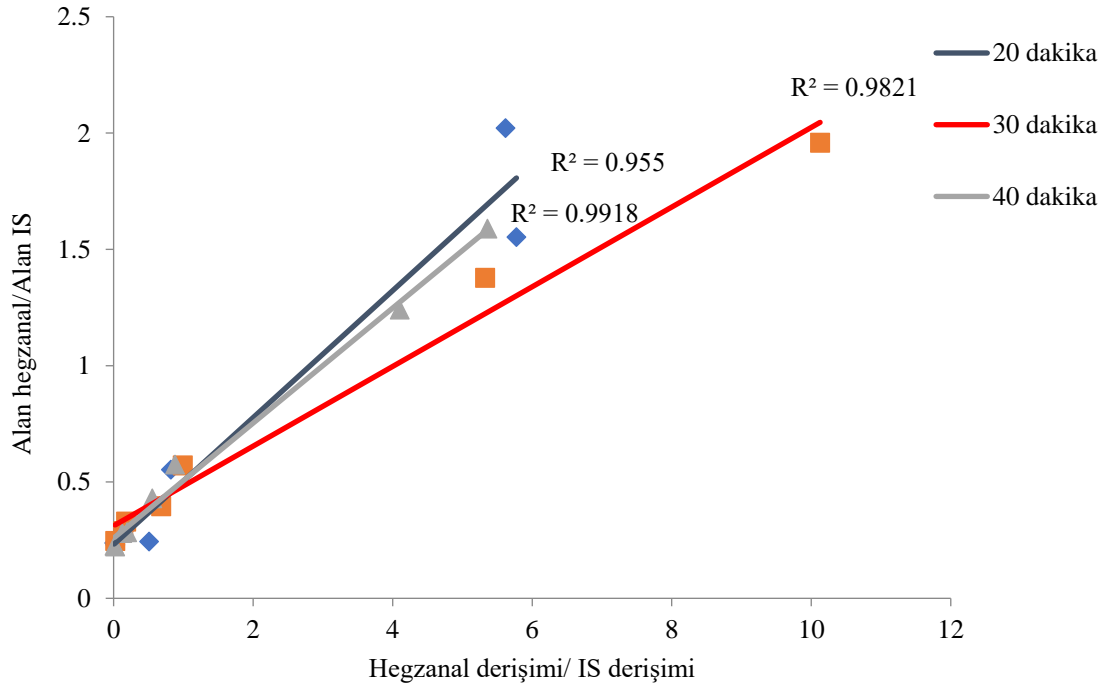
50 °C'de 20, 30 ve 40 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında HE ve IS arasındaki ilişkisini gösteren denklem ve korelasyon katsayıları Çizelge 2 ve Şekil 6'da verilmiştir.

Çizelge 2. 50 °C'de farklı sürelerde ekstraksiyon uygulanmasıyla elde edilen regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları

Bileşen	Süre	Regresyon Denklemi	Korelasyon Katsayısı (R <sup>2</sup> )
HE	20	$y = 0.272x + 0.231$	0.955
	30	$y = 0.171x + 0.311$	0.982
	40	$y = 0.247x + 0.258$	0.991
MA	20	$y = 0.005x + 0.028$	0.562
	30	$y = 0.005x + 0.048$	0.606
	40	$y = 0.005x + 0.063$	0.134

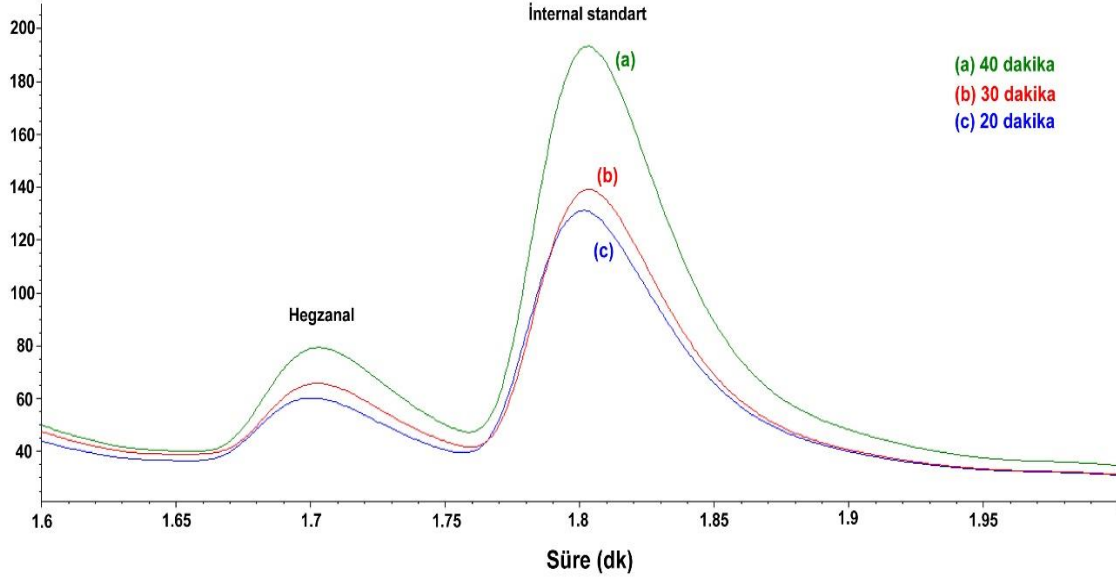
HE :Hegzanal, MA: Malonaldehit, x: HE veya MA'nın derişimi/IS'nin derişimi; y: HE veya MA'nın alanı/IS'nin alanı

20 dk'lık bir ekstraksiyonla elde edilen R<sup>2</sup> değeri 0.955 olarak tespit edilmiştir. 30 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında elde edilen R<sup>2</sup> değeri 0.982 olarak bulunurken; ekstraksiyon süresi 40 dk olduğunda R<sup>2</sup> değeri 0.991 olarak saptanmıştır. R<sup>2</sup> değerleri incelendiğinde 50 °C için en uygun ekstraksiyon süresi 40 dk olduğu görülmektedir. Sürenin artmasına bağlı olarak R<sup>2</sup> değerlerinde artış gözlemlenmiştir.



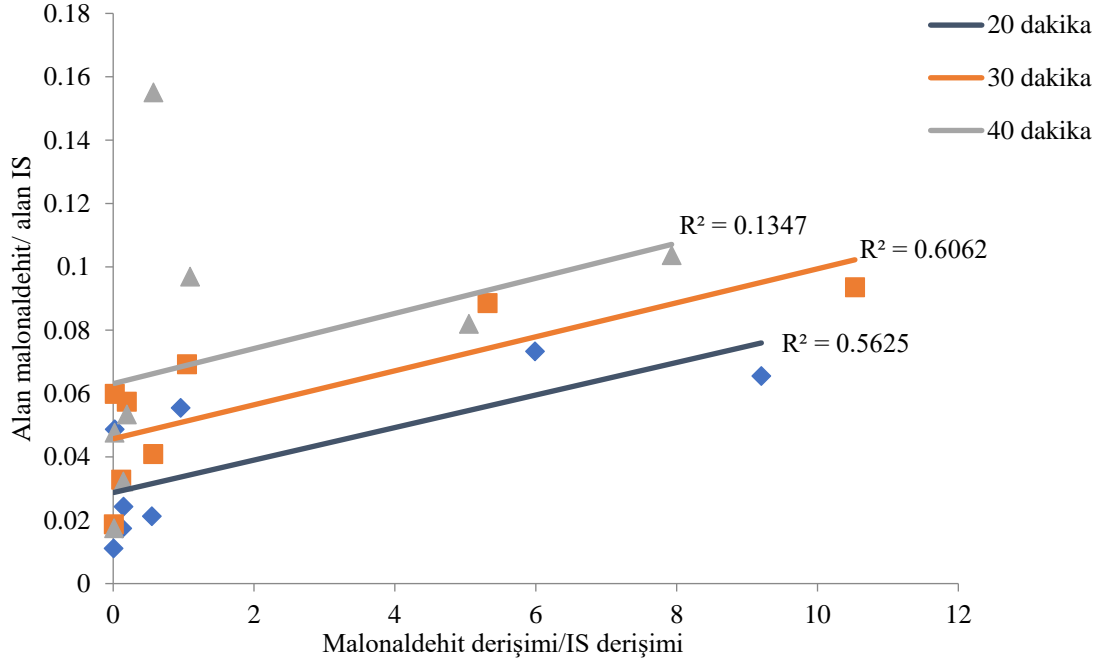
Şekil 6. Ayçiçeğı yağında 50 °C'de farklı sürelerde HE ile IS arasındaki derişim ve alan oranları ilişkisi.

100 ppb HE ve 500 ppb IS ilave edilmiş ayçiçeği yağına 50 °C’de 20, 30 ve 40 dk boyunca yapılan ekstraksiyon sonucunda GC’den elde edilen kromatogram Şekil 7.’de gösterilmektedir. 50 °C’de yapılan ekstraksiyonda sürenin artmasına bağlı olarak pik alanlarında artış gözlemlenmiştir. R<sup>2</sup> değerleri göz önünde bulundurulduğunda bu sıcaklık için en uygun süre 40 dk olduğu görülmektedir.



Şekil 7. 100 ppb HE ilave edilmiş ayçiçeği yağında 50° C’de 20, 30 ve 40 dk ekstraksiyon sonrası meydana gelen GC kromatogramı.

50 °C’de 20, 30 ve 40 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında MA’nın IS ile olan ilişkini gösteren regresyon denklemi ve korelasyon katsayıları Çizelge 2 ve Şekil 8’de gösterilmiştir. 20 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında elde edilen R<sup>2</sup> değeri 0.562 iken 30 dk ekstraksiyon uygulandığında R<sup>2</sup> değeri 0.606 bulunmuştur. Son olarak 40 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında elde edilen R<sup>2</sup> değeri 0.134 olarak tespit edilmiştir. R<sup>2</sup> değerlerine bakıldığında 50 °C’de en yüksek korelasyon 30 dk’da elde edilmiştir. Ancak bulunan bu değer MA ve IS arasındaki doğrusal ilişkiyi göstermek için yeterli değildir. Başka bir deyimle MA ile IS arasındaki doğrusal ilişkinin düşük düzeyde olması MA’nın nicel analizinde doğru sonuç vermemesine yol açmaktadır.



Şekil 8. Ayçiçeği yağında 50 °C’de farklı sürelerde MA ile IS arasındaki derişim ve alan oranları ilişkisi.

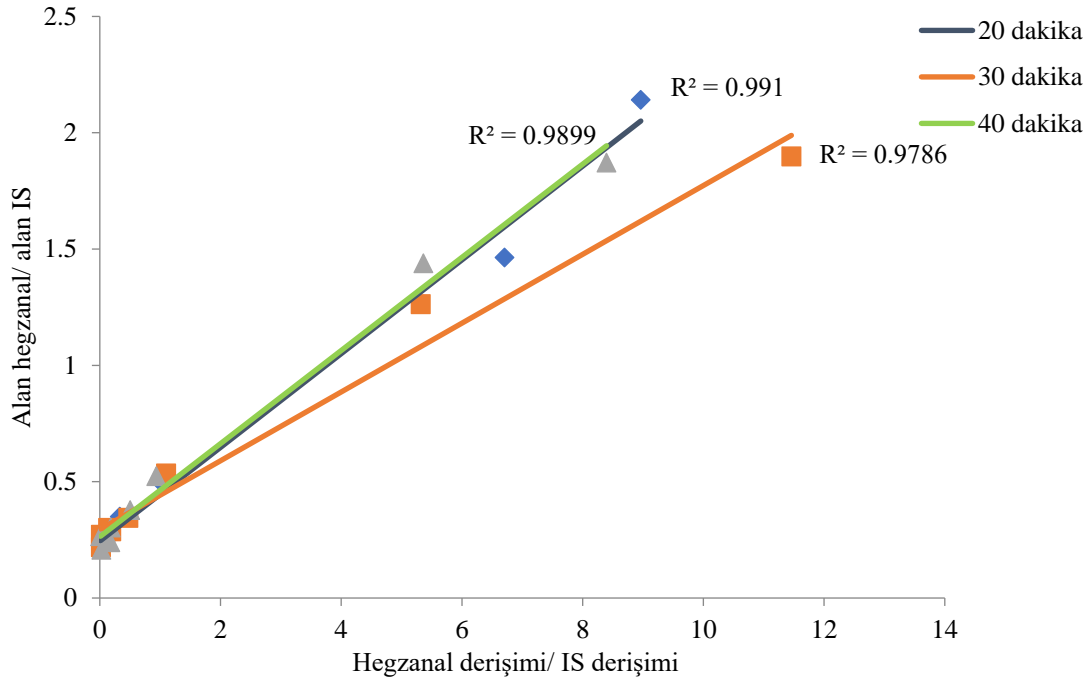
60 °C’de 20, 30 ve 40 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında HE ve IS arasındaki ilişkini gösteren denklem ve korelasyon katsayıları Çizelge 3 ve Şekil 9’da verilmiştir. 20 dk’da ekstraksiyon sonucu elde edilen korelasyon katsayısı 0.991 olarak bulunurken; 30 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında elde edilen korelasyon katsayısı 0.978 olarak tespit edilmiştir. Ekstraksiyon süresi 40 dk olduğunda ise korelasyon katsayısı 0.989 olarak saptanmıştır. R<sup>2</sup> değerleri incelendiğinde 60 °C için en uygun ekstraksiyon süresinin 20 dk olduğu görülmektedir. Nzekoue ve ark. (2019) peynirde depolama süresince oluşan hegzanalı tespit etmek yapmış oldukları çalışmada ekstraksiyon koşullarını 60 °C ve 20 dk olarak belirlemişlerdir.

Çizelge 3. 60 °C’de farklı sürelerde ekstraksiyon uygulanmasıyla elde edilen regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları

Bileşen	Süre	Regresyon Denklemi	Korelasyon Katsayısı (R <sup>2</sup> )
HE	20	y = 0.201x + 0.244	0.991
	30	y = 0.147x + 0.294	0.978
	40	y = 0.200x + 0.263	0.989
MA	20	y = 0.007x + 0.045	0.406
	30	y = 0.007x + 0.118	0.094
	40	y = 0.012x + 0.116	0.118

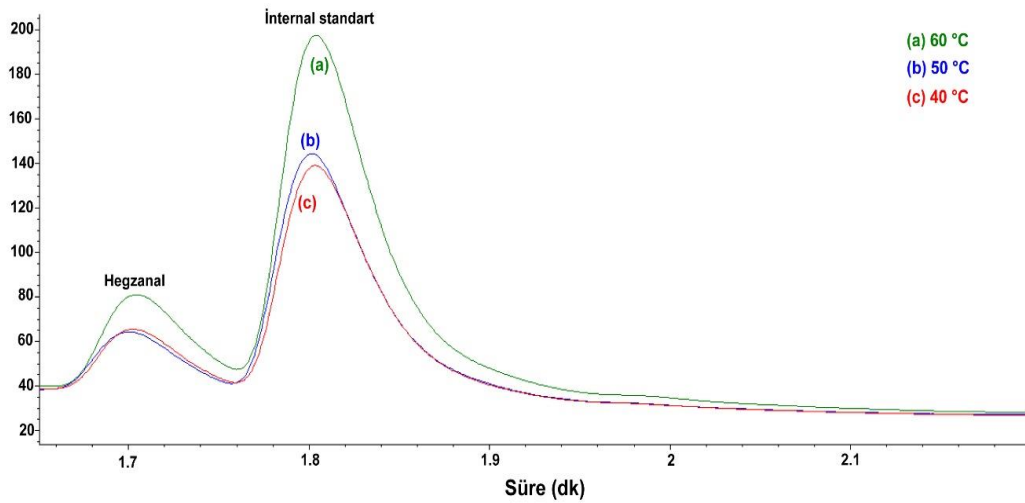
HE :Hegzanal, MA: Malonaldehit, x: HE veya MA’nın derişimi/IS’nin derişimi; y: HE veya MA’nın alanı/IS’nin alanı





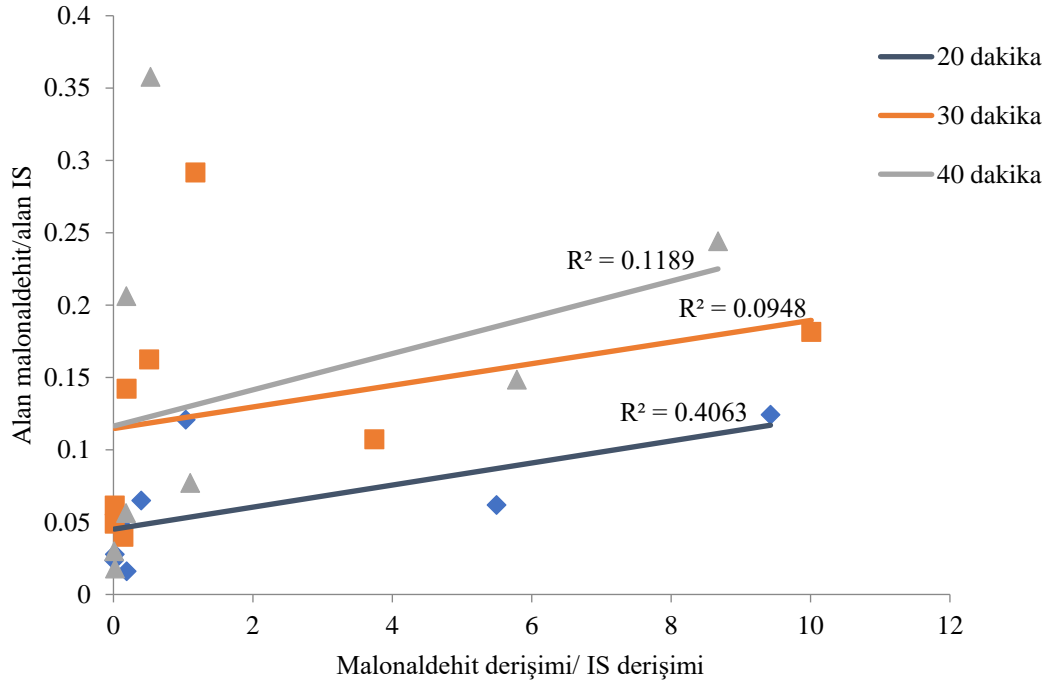
Şekil 9. Ayçiçeği yağında 60 °C'de farklı sürelerde HE ile IS arasındaki derişim ve alan oranları ilişkisi.

Ayçiçeği yağına 100 ppb HE ve 500 ppb IS ilave edilerek 30 dk boyunca 40, 50 ve 60 °C'de yapılan ekstraksiyon sonucu elde edilen kromatogram Şekil 10'da gösterilmiştir. Sıcaklık 40 ve 50 °C olduğunda piklerin özellikleri benzer davranış gösterirken, 60 °C'de daha keskin ve belirgin bir pik elde edilmiştir. GC'den elde edilen piklerin nicel analizde kullanılabilmesi için mümkün olduğunca keskin ve belirgin olması gerekmektedir. Keskin piklerin elde edilmesi ile bileşenler arasındaki ilişkiyi tespit etmek mümkündür. Ayçiçeği yağında kullanılan sıcaklık değerleri göz önünde bulundurulduğunda uygulanması gereken en uygun sıcaklık 60 °C olduğu tespit edilmiştir. 60 °C'de uygulanan süreler bakımından en uygun süre 20 dk ( $R^2 = 0.991$ ) olduğu saptanmıştır. Iglesias ve ark. (2007), balık yağı ile zenginleştirilmiş süt ve mayonezlerdeki oksidasyon sonucu oluşan bileşenleri tespit etmek için geliştirmiş oldukları yöntemde 60 °C'de 30 dk boyunca ekstraksiyon işlemi uygulamışlardır.



Şekil 10. 100 ppb HE ilave edilmiş ayçiçeği yağında 30 dk'da 40, 50 ve 60 °C'de ekstraksiyon sonrası elde edilen kromatogram.

60 °C’de 20, 30 ve 40 dk boyunca ekstraksiyon uygulandığında MA ve IS arasındaki ilişkiyi gösteren denklem ve korelasyon katsayıları Çizelge 3 ve Şekil 11’de gösterilmektedir.



Şekil 11. Ayrıççeği yağında 60 °C’de farklı sürelerde MA ile IS arasındaki derişim ve alan oranları ilişkisi.

20 dk ekstraksiyon uygulandığında elde edilen  $R^2$  değeri 0.045 olarak tespit edilirken 30 dk ekstraksiyon uygulandığında  $R^2$  değeri 0.094 ve 40 dk ekstraksiyon sonucu elde edilen  $R^2$  değeri 0.118 olarak saptanmıştır.  $R^2$  değerleri dikkate alındığında 60 °C’de en yüksek korelasyon 20 dk’lık ekstraksiyonda bulunmuştur. Ancak bulunan bu değer MA ve IS arasındaki doğrusal ilişkiyi göstermek için yeterli değildir.

#### 4. Sonuç

Yapılan bu çalışmada HE ve IS arasında doğrusal bir ilişki saptanırken, MA ve IS arasındaki ilişkinin doğrusallık düzeyi düşük bulunmuştur. MA ve IS arasındaki en yüksek  $R^2$  değeri ( $R^2 = 0.606$ ) 50 °C’de 30 dk’lık ekstraksiyonda görülmüştür. Ancak bu değer MA ve IS arasındaki doğrusal ilişkiyi açıklamak için yeterli değildir. MA’nın düşük korelasyon göstermesinin nedeni oldukça reaktif ve polar bir bileşen olmasından kaynaklanmaktadır. HE ve IS arasında yakın bir ilişki saptanmıştır ( $0.955 < R^2 < 0.992$ ). 60 °C sıcaklık uygulandığında oluşan pikler diğer sıcaklıklara göre daha keskin ve belirgin olduğu görülmüştür. Bundan dolayı en uygun ekstraksiyon sıcaklığı 60 °C ve en uygun süre 20 dk ( $R^2 = 0.991$ ) olarak saptanmıştır. Ekstraksiyon süre ve sıcaklığı prosesin etkinliğini belirleyen temel parametrelerdir.

Sonuç olarak, 3 fazlı SPME’nin doğrudan ayrıççeği yağından MA’nın ekstraksiyonu ve GC analizi için uygun olmadığı tespit edilmiştir. 3 faz SPME’nin HE’nin ekstraksiyonu ve nicel analizi için uygulanabileceği ve  $R^2$  değerine bakıldığında HE’nin ayrıççeği yağında tespit edilebileceği en uygun koşulun 60 °C’de 20 dk ( $R^2 = 0.991$ ) olduğu saptanmıştır. Bu verilerin doğrultusunda, uygulanan parametrelerle (süre ve sıcaklık) hazırlanan kalibrasyon eğrilerinden yararlanılarak elde edilen regresyon denklemlerinin HE miktarının hesaplanmasında kullanılabileceği düşünülmektedir.

## Kaynakça

- Bak, K. H., Rankin, S. A., & Richards, M. P. (2020). Hexanal as a marker of oxidation flavour in sliced and uncured deli turkey with and without phosphates using rosemary extracts. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(9), 3104-3110. doi:10.1111/ijfs.14574
- Brunton, N. P., Cronin, D. A., Monahan, F. J., & Durcan, R. (2000). A comparison of solid-phase microextraction (SPME) fibres for measurement of hexanal and pentanal in cooked turkey. *Food Chemistry*, 68(3), 399-345. doi:10.1016/S0308-8146(99)00203-4
- Camiletti, O. F., Bergesse, A. E., Aleman, R., Riveros, C. G., & Grosso, N. R. (2023). Application of chickpea-based edible coating with chickpea husk polyphenols on the preservation of sunflower seeds. *Journal of Food Science*, 88(4), 1-16. doi:10.1111/1750-3841.16489
- Choe, E., & Min, D. B. (2006). Mechanisms and factors for edible oil oxidation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 5(4), 169-186. doi:10.1111/j.1541-4337.2006.00009.x
- Dadalı, C., & Elmacı, Y. (2019). Optimization of Headspace-Solid Phase Microextraction (HSSPME) technique for the analysis of volatile compounds of margarine. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 4834-4843. doi:10.1007/s13197-019-03945-w
- Fan, X. (2002). Measurement of malonaldehyde in apple juice using GC-MS and a comparison to the thiobarbituric acid assay. *Food Chemistry*, 77(3), 353-359. doi:10.1016/S0308-8146(02)00110-3
- Fujioka, K., & Shibamoto, T. (2005). Improved malonaldehyde assay using headspace solid-phase microextraction and its application to measurement of the antioxidant activity of phytochemicals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 4708-4713. doi:10.1021/jf050297q
- Iglesias, J., Lois, S., & Medina, I. (2007). Development of a solid-phase microextraction method for determination of volatile oxidation compounds in fish oil emulsions. *Journal of Chromatography A*, 1163, 277-287. doi:10.1016/j.chroma.2007.06.036
- Jalili, V., Barkhordari, A., & Ghiasvand, A. (2020). A comprehensive look at solid-phase microextraction technique: A review of reviews. *Microchemical Journal*, 152, 104319. doi:10.1016/j.microc.2019.104319
- Javidipour, I., & Qian, M. C. (2008). Volatile component change in whey protein concentrate during storage investigated by headspace solid-phase microextraction gas chromatography. *Dairy Science and Technology*, 88, 95-104. doi:10.1051/dst:2007010
- Kayaalp, G. T., & Çankaya, S. (2008). *İstatistik 5*. baskı. Adana: Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Yay. No: 258.
- Ma, C., Ji, J., Tan, C., Chen, D., Luo, F., Wang, Y., & Chen, X. (2014). Headspace solid-phase microextraction coupled to gas chromatography for the analysis of aldehydes in edible oils. *Talanta*, 120, 94-99. doi:10.1016/j.talanta.2013.11.021
- Maher, P. G., Roos, Y. H., Kilcawley, K. N., Auty, M. A. E., & Fenelon, M. A. (2015). Levels of pentanal and hexanal in spray dried nanoemulsions. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), 1069-1075. doi:10.1016/j.lwt.2015.04.044
- Mariutti, L. R. B., Nogueira, G. C., & Bragagnolo, N. (2009). Solid phase microextraction-gas chromatography for evaluation of secondary lipid oxidation product during long-term storage. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 20(10), 1849-1855. doi:10.1590/S0103-50532009001000012
- Nzekoue, F. K., Caprioli, G., Fiorini, D., Torregiani, E., Vittori, S., & Sagratini, G. (2019). HS-SPME-GC-MS technique for FFA and hexanal analysis in different cheese packaging in the course of long-term storage. *Food Research International*, 121, 730-737. doi:10.1016/j.foodres.2018.12.048
- Panseri, S., Soncin, S., Chiesa, L. M., & Biondi, P. A. (2011). A headspace solid-phase microextraction gas-chromatographic mass-spectrometric method (HS-SPME-GC/MS) to quantify hexanal in butter during storage as marker of lipid oxidation. *Food Chemistry*, 127(2), 886-889. doi:10.1016/j.foodchem.2010.12.150
- Pawliszyn, J. (2012). Theory of Solid Phase Microextraction. In J. Pawliszyn (Ed.), *Handbook of Solid Phase Microextraction* (pp. 13-59). Amsterdam, Holland: Elsevier Press. doi:10.1093/chromsci/38.7.270

- Pignoli, G., Bou, R., Rodriguez-Estrada, M. T., & Decker, E. A. (2009). Suitability of saturated aldehydes as lipid oxidation markers in washed turkey meat. *Meat Science*, 83(3), 412-416. doi:10.1016/j.meatsci.2009.06.019
- Prosen, H., & Kralj, L.Z. (1999). Solid-phase microextraction. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 18(4), 272-282. doi:10.1016/S0165-9936(98)00109-5
- Ruan, E. D., Aalhus, J., & Juárez, M. (2014). A rapid, sensitive and solvent-less method for determination of malonaldehyde in meat by stir bar sorptive extraction coupled thermal desorption in situ derivatization. *Rapid Communication in Mass Spectrometry*, 28(24), 2723-2728. doi:10.1002/rcm.7058
- Shin, H. S. (2009). Determination of malondialdehyde in human blood by headspace-solid phase micro-extraction gas chromatography-mass spectrometry after derivatization with 2,2,2-trifluoroethylhydrazine. *Journal of Chromatography B*, 77(29), 3707-3711. doi:10.1016/j.jchromb.2009.09.022
- Shin, H. S., & Jung, D. G. (2009). Sensitive analysis of malondialdehyde in human urine by derivatization with pentafluorophenylhydrazine then headspace GC-MS. *Chromatographia*, 70, 899-903. doi:10.1365/s10337-009-1235-4
- Spietelun, A., Kloskowski, A., Chrzanowski, W., & Namiesnik, J. (2013). Understanding solid-phase microextraction: Key factors influencing the extraction process and trends in improving the technique. *Chemical Reviews*, 113, 1667-1685. doi:10.1021/cr300148j
- Umano, K., Dennis, K. J., & Shibamoto, T. (1988). Analysis of free malondialdehyde in photo irradiated corn oil and beef fat via a pyrazole derivative. *Lipids*, 23, 811-814. doi:10.1007/BF02536226
- Vandemoortele, A., Heynderickx, P. M., Leloup, L., & Meulenaer, B. D. (2021). Kinetic modeling of malondialdehyde reactivity in oil to simulate actual malondialdehyde formation upon lipid oxidation. *Food Research International*, 140, 110063. doi:10.1016/j.foodres.2020.110063
- Vas, G., & Vékely, K. (2004). Solid-phase microextraction: a powerful sample preparation tool prior to mass spectrometric analysis. *Journal of Mass Spectrometry*, 39(3), 233-254. doi:10.1002/jms.606
- Xu, Y. H., Chen, X. W., Li, J., & Bi, Y. (2023). Approach to evaluate the sensory quality deterioration of chicken seasoning using characteristic oxidation indicators. *Food Chemistry: X*, 17, 100564. doi:10.1016/j.fochx.2023.100564



Research Article

**Soft Switching for MOSFET and IGBT-Based Hybrid DC-DC Boost Converter**

**İbrahim Halil DİLBER<sup>1</sup>, Hasan ÜZMUŞ<sup>2</sup>, Mehmet Ali ÇELİK<sup>\*3</sup>, Naci GENÇ<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Van Yüzüncü Yıl University, Başkale Vocational School, Electrical and Energy Department, 65080, Van, Türkiye

<sup>2</sup> Van Yüzüncü Yıl University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, 65080, Van, Türkiye

<sup>3</sup> Ağrı İbrahim Çeçen University, Vocational School, Electrical and Energy Department, 04000, Ağrı, Türkiye

<sup>4</sup> Yalova University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, 77000, Yalova, Türkiye

İbrahim Halil DİLBER, [ORCID No: 0000-0001-9748-7772](#), Hasan ÜZMUŞ, [ORCID No: 0000-0001-7851-0041](#), Mehmet Ali ÇELİK, [ORCID No: 0000-0001-9221-1099](#), Naci GENÇ, [ORCID No: 0000-0001-5673-1708](#)

\*Corresponding author e-mail: [macelik@agri.edu.tr](mailto:macelik@agri.edu.tr)

**Article Info**

Received: 19.10.2022  
Accepted: 27.01.2023  
Online August 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1191137](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1191137)

**Keywords**

DC-DC hybrid boost converter,  
Soft switching,  
ZCT,  
ZVT

**Abstract:** In this study, the active soft switching (SS) methods were proposed for the MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with high voltage gain. The zero-voltage transition (ZVT) and the zero-current transition (ZCT) active SS methods were applied to the hybrid DC-DC boost converter with MOSFET and IGBT main switches, respectively. Thus, the hard switching (HS) power losses of MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter was reduced. The MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with variable loads was simulated in OrCAD-PSpice environment for SS methods (ZVT and ZCT) and HS. The simulation results show that SS methods increased the efficiency of the hybrid DC-DC boost converter, nearly 1%.

**MOSFET ve IGBT Tabanlı Hibrit DC-DC Boost Dönüştürücü için Yumuşak Anahtarlama**

**Makale Bilgileri**

Geliş: 19.10.2022  
Kabul: 27.01.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1191137](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1191137)

**Anahtar Kelimeler**

DC-DC hibrit boost dönüştürücü,  
Yumuşak anahtarlama,  
ZCT,  
ZVT

**Öz:** Bu çalışmada, yüksek voltaj kazancına sahip MOSFET ve IGBT tabanlı hibrit DC-DC yükseltici dönüştürücü için aktif yumuşak anahtarlama yöntemleri önerilmiştir. MOSFET ve IGBT ana anahtarlı hibrit DC-DC yükseltici dönüştürücüye sırasıyla sıfır voltaj geçişli ve sıfır akım geçişli aktif yumuşak anahtarlama yöntemleri uygulandı. Böylece MOSFET ve IGBT tabanlı hibrit DC-DC yükseltici dönüştürücünün sert anahtarlama kaynaklı güç kayıpları azaltılmıştır. Değişken yüklere sahip MOSFET ve IGBT tabanlı hibrit DC-DC yükseltici dönüştürücü, yumuşak anahtarlama yöntemleri ve sert anahtarlama için OrCAD-PSpice ortamında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, yumuşak anahtarlama yöntemlerinin hibrit DC-DC yükseltici dönüştürücünün verimini %1 kadar arttırdığını göstermektedir.

## 1. Introduction

DC-DC converters have an essential importance in many fields such as sustainable and renewable energy systems, mobile electrical devices, communication systems, hybrid electric power systems, electric vehicles, and uninterruptible power supplies (Hai-Bo & Kim, 2021). The DC-DC converters are used to obtain the desired output voltage in the cases given in (Guo et al., 2015; Theunisse et al., 2015; Yang et al., 2017). There are two types of DC-DC converters such as isolated and non-isolated for different applications (Alassi et al., 2017). The different structures of isolated DC-DC converters have been proposed in many scientific publications in the power electronics area (Gopi & Saravanakumar, 2014). The non-isolated DC-DC converter is very attractive due to its low cost, easy modelling, small size, simple design application and manufacturing (Forouzesh et al., 2017).

The applications with non-isolated DC-DC converters can be achieved with higher efficiency and power density by smaller step rates (Biela et al., 2009). The DC-DC boost converters in continuous conduction mode (CCM) have become very common, especially in applications where the input voltage should be greater than the output voltage (Kobaku et al., 2021).

In particular, the low-level DC voltage value provided by renewable energy sources can be used for on-grid or off-grid systems by stepping up with non-isolated DC-DC boost converters. The researchers have focused on the non-isolated DC-DC converters with high efficiency and conversation ratio. In applications requiring high voltage gain, where the conventional DC-DC boost converter is insufficient, Switching Capacitor circuits that are applied with a switch and capacitor can be a solution. Another solution is the DC-DC boost converters obtained by adding the diodes and capacitors to the conventional boost converters (Rosas-Caro et al., 2018).

The high power density and efficiency can be achieved for converters by reducing the power losses as much as possible. The main cause of power losses is switching, generally (Pavlovsky et al., 2014). HS converters are often switched at high frequencies for high power densities and fast transient responses (Eskandari et al., 2020); but operating at high frequencies increases switching losses and electromagnetic interference (EMI) noise (Genc & Koc, 2017). There are two SS methods such as passive and active. The passive SS methods consist of diodes, capacitors and inductors and cause high current and voltage stresses on the main switch. The active SS methods consist of an auxiliary switch added to the circuit elements used for the passive SS methods (Dao & Lee, 2020).

The main purpose of this study is to make SS for MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with ZVT and ZCT, respectively. The total efficiency of MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter was increased by reducing switching losses with ZVT and ZCT. The MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with SS and HS was simulated in OrCAD-PSpice environment for 200W.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Hybrid DC-DC boost converter

It is possible to operate the conventional DC-DC boost converter for high voltage gain with high duty cycle ( $d$ ). However, high  $d$  levels cause undesired errors, so  $d$  should be limited (Wai & Duan, 2005). The hybrid DC-DC boost converter is a superb candidate. Because it can reach desired high voltage gain via smaller  $d$  (Padmanaban et al., 2015). The hybrid DC-DC boost converter is operated by only one switch (Lange et al., 2014). The hybrid DC-DC boost converter, operation modes and waveforms are given in Figure1.



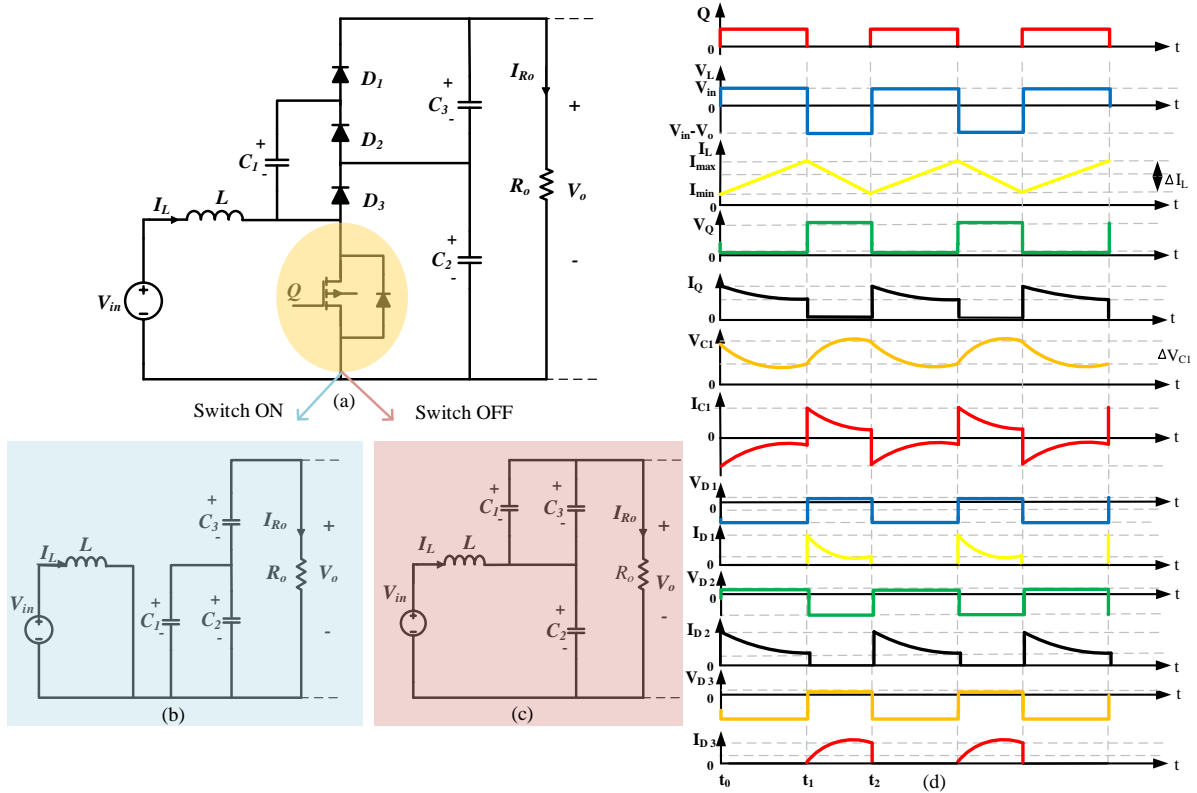


Figure 1. (a) Hybrid DC-DC boost converter, (b) when switch Q is on (c) when switch Q is off, and (d) the waveforms.

The relationship between input and output voltages for the hybrid DC-DC boost converter was given in Equation 1.

$$V_o = 2 \frac{V_{in}}{(1 - d)} \quad (1)$$

The critical levels of components for the hybrid DC-DC boost converter were determined according to the information given in (Rashid, 2004). The components of the hybrid DC-DC boost converter are given in Table 1.

Table 1. The components of the hybrid DC-DC boost converter.

Parameters for the hybrid DC-DC boost converter	Values
Output power ( $P_o$ )	200 W
Input voltage ( $V_{in}$ )	40-100 V
Output voltage ( $V_o$ )	200 V
Switching frequency ( $f_s$ )	50 kHz
Inductor ( $L$ )	500 mH
Capacitors ( $C1, C2, C3$ )	25, 470, 470 $\mu$ F
Switch ( $Q$ )(MOSFET/IGBT)	IRFP460/ IXGN24N60C4D1
Diodes ( $D1, D2, D3$ )	DSEP8-12A

## 2.2. ZVT and ZCT for hybrid DC-DC boost converter

The main losses of the hybrid DC-DC boost converter are related to the main switch ( $Q$ ) states. These losses reduce the total efficiency of the hybrid DC-DC boost converter. The hybrid DC-DC boost converter consists of the main switch ( $Q$ ), main inductor ( $L$ ),  $D1, D2, D3, C1, C2, C3$ , and  $R_o$  as shown in Figure 1(a). The auxiliary circuit for ZVT and ZCT consists of a resonance inductor

( $L_a$ ), capacitors ( $C_a$ ,  $C_s$ ), two auxiliary diodes ( $D_{a1}$ ,  $D_{a2}$ ) and a switch ( $Q_a$ ). The proposed ZVT SS method was preferred for MOSFET-based hybrid DC-DC converter because of the parasitic capacitance that occur on the MOSFET when the MOSFET turns on (Yao & Xiao, 2013). Also, the proposed ZCT SS method was used for the IGBT-based converter due to the tail currents that occur when the IGBT turns off (Wang et al., 2014).

### 2.3. MOSFET-based hybrid DC-DC boost converter with ZVT

While the main switch of the MOSFET-based hybrid DC-DC converter is turning on, it is desired that the voltage on the main switch is zero during the current transition. It can be achieved by utilizing ZVT. The components of the hybrid DC-DC boost converter were summarized in Table 1. The components of the auxiliary circuit for MOSFET-based hybrid DC-DC converter were given in Table 2. The MOSFET-based hybrid DC-DC converter with the auxiliary circuit for ZVT is given in Figure 2. The power losses of main switch (MOSFET) were reduced with ZVT SS method.

Table 2. The components of the auxiliary circuit for the MOSFET-based hybrid DC-DC converter

Parameters for the auxiliary	Values
Auxiliary switch ( $Q_a$ )	IRFP460
Auxiliary switching frequency ( $f_{sa}$ )	50 kHz
Auxiliary inductor ( $L_s$ )	4 $\mu$ H
Auxiliary diodes ( $D_{a1}$ , $D_{a2}$ )	DSEP8-12A
Auxiliary capacitors ( $C_s$ , $C_a$ )	1.4, 6 nF

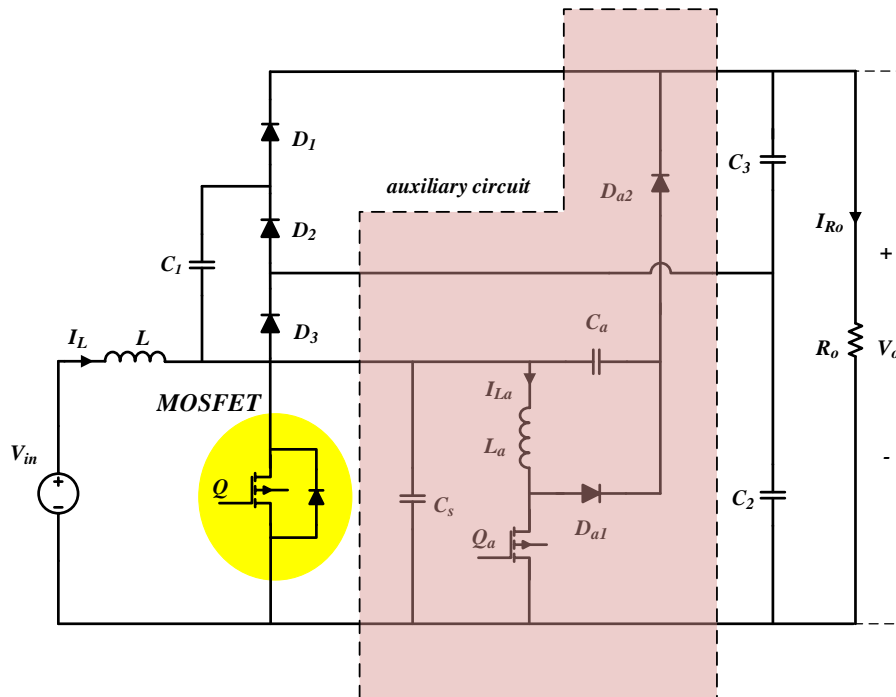


Figure 2. The MOSFET-based hybrid DC-DC converter with the auxiliary circuit for ZVT.

### 2.4. IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with ZCT

While the main switch of IGBT-based hybrid DC-DC converter is turning off, it is desired that the current is zero during voltage transition and it can be done via ZCT. The components of the hybrid DC-DC boost converter were summarized in Table 1. The components of the auxiliary circuit for IGBT-based hybrid DC-DC converter were given Table 3.

Table 3. The components of the auxiliary circuit for IGBT-based hybrid DC-DC converter

Parameters for the auxiliary	Values
Auxiliary switch ( $Q_a$ )	IRFP460
Auxiliary switching frequency ( $f_{sa}$ )	50 kHz
Auxiliary inductor ( $L_a$ )	4 $\mu$ H
Auxiliary diodes ( $D_{a1}$ , $D_{a2}$ )	DSEP8-12A
Auxiliary capacitors ( $C_s$ , $C_a$ )	1.4, 6 nF

The IGBT-based hybrid DC-DC converter with the auxiliary circuit for ZCT is given in Figure 3. The power losses of main switch (IGBT) were reduced with ZCT SS method.

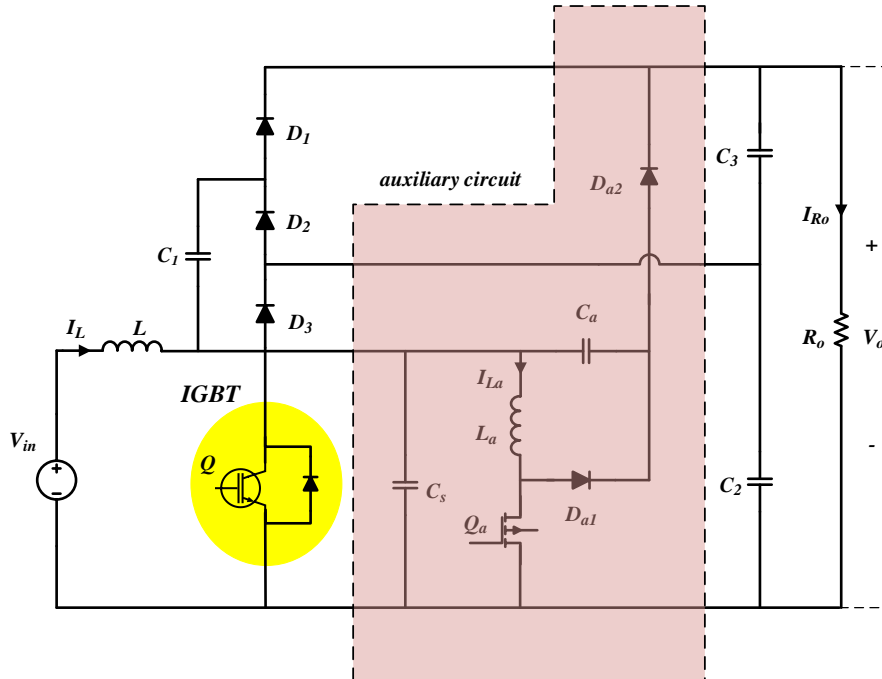


Figure 3. The IGBT-based hybrid DC-DC converter with the auxiliary circuit for ZCT.

### 3. Results

The MOSFET-based hybrid DC-DC boost converter with ZVT and the IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with ZCT were operated for variable loads in OrCAD-PSpice environment.

Table 4. The efficiency of MOSFET-based hybrid DC-DC boost converter

$P_o$	HS	ZVT
100 W	%93,84	%94,73
200 W	%96,05	%96,97
300 W	%97,18	%98,11

Table 5. The efficiency of IGBT-based hybrid DC-DC boost converter

$P_o$	HS	ZCT
100 W	%93,71	%94,68
200 W	%95,43	%96,39
300 W	%96,37	%97,08

The efficiency of MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter for HS and SS under variable loads is given in Table 4, Table 5 and Figure 4. The simulation results of MOSFET-based hybrid DC-DC boost converter with ZVT and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with ZCT are given in this section.

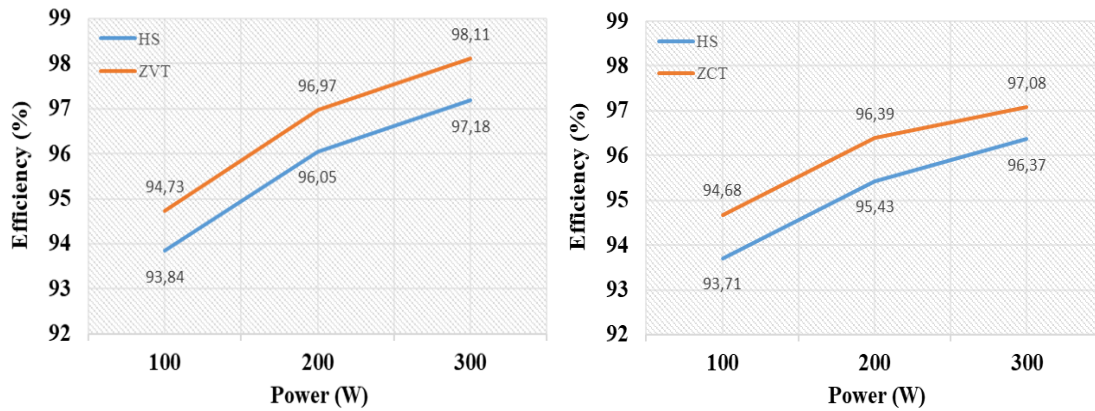


Figure 4. The efficiency of MOSFET (ZVT) and IGBT (ZCT)-based hybrid DC-DC boost converter for HS and SS under variable load.

### 3.1. Simulation results for MOSFET-based hybrid DC-DC boost converter with ZVT

The MOSFET-based hybrid DC-DC boost converter that operated for 200 W was simulated to compare HS and SS (ZVT). The simulation results of proposed system were given in Figure 5.

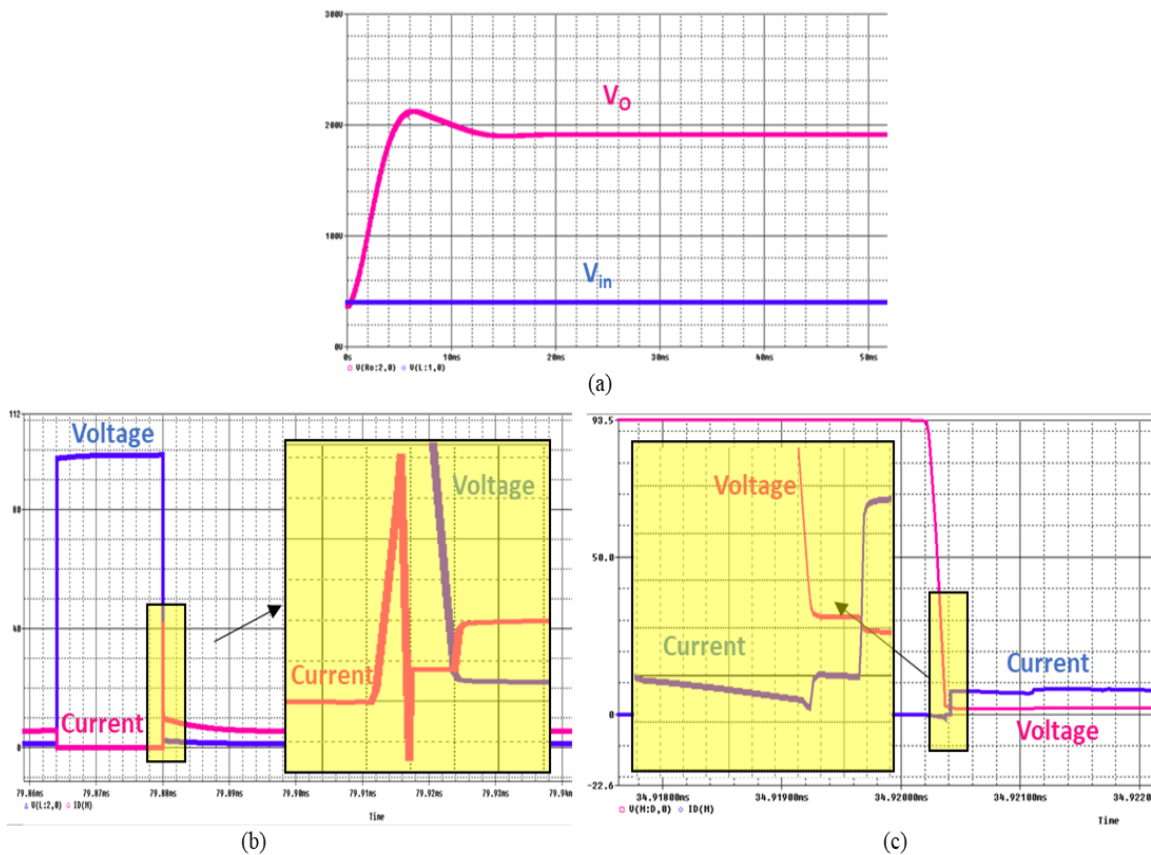


Figure 5. The simulation results of MOSFET-based hybrid DC-DC converter for (a)  $V_{in}$ - $V_o$ , (b) HS and (c) SS (ZVT).

The input and output voltage of the proposed system were given in Figure 5(a). While the main switch (MOSFET) was turning off, the power losses occurred due to the parasitic capacitance of the MOSFET. As can be seen in Figure 5(b), the MOSFET power losses was quite high for the MOSFET-based hybrid DC-DC converter with HS. The power losses were reduced by applying ZVT SS method to the MOSFET-based hybrid DC-DC converter (Figure 5(c)). Thus, the efficiency of the MOSFET-based hybrid DC-DC converter was increased.

### 3.2. Simulation results for IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with ZCT

The IGBT-based hybrid DC-DC boost converter that operated for 200 W was simulated to compare HS and SS (ZCT). The simulation results of proposed system were given in Figure 6.

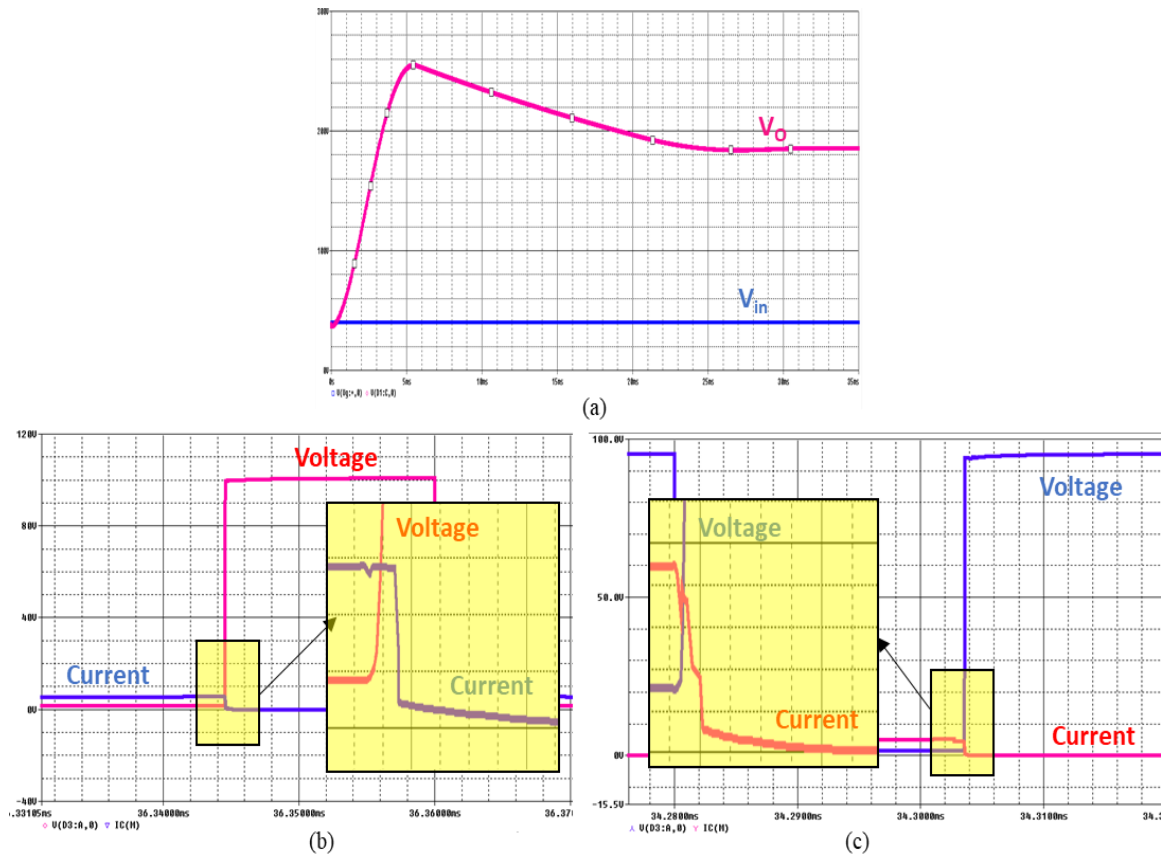


Figure 6. The simulation results of IGBT-based hybrid DC-DC converter for (a)  $V_{in}$ - $V_o$ , (b) HS and (c) ZCT.

The input and output voltage of the proposed system were given in Figure 6(a). The IGBT-based hybrid DC-DC converter was operated for HS, the tail current on the main switch (IGBT) was given in Figure 6(b). The tail current of IGBT was considerably shortened as in Figure 6(c) thanks to the ZCT SS method. Thus, the power losses on IGBT, while it was turning off were decreased and the efficiency of the IGBT-based hybrid DC-DC converter was increased.

### 4. Discussion and Conclusion

In this study, a hybrid DC-DC boost converter with SS was presented for different main switches (MOSFET/IGBT). The MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter was simulated for 200 W in OrCAD-PSpice environment with ZVT and ZCT, respectively. The auxiliary circuit was used to operate the MOSFET-based hybrid DC-DC boost converter with ZVT and the IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with ZCT. The components of the auxiliary circuit used

for the SS were determined separately for the MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter. In the MOSFET-based hybrid DC-DC boost converter, the power losses on the main switch occur while the main switch turns on. The power losses on the main switch for the IGBT-based hybrid DC-DC boost converter occur while the main switch turns off. The total efficiency of the hybrid DC-DC boost converter increased about 1% via SS methods for variable loads. In the future, ZVT and ZCT can be applied together to both the MOSFET and IGBT-based hybrid DC-DC boost converter with the auxiliary circuit during a switching period.

## References

- Alassi, A., Al-Aswad, A., Gastli, A., Brahim, L. B., & Massoud, A. (2017). *Assessment of isolated and non-isolated dc-dc converters for medium-voltage pv applications*. 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE), Manama, Bahreyn. doi:10.1109/IEEEGCC.2017.8448079
- Biela, J., Badstuebner, U., & Kolar, J. W. (2009). Impact of power density maximization on efficiency of dc-dc converter systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(1), 288-300. doi:10.1109/TPEL.2009.2006355
- Dao, N. D., & Lee, D. C. (2020). *Passive soft-switching circuit for high power density sic-based dc-dc boost converter*. 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), New Orleans, LA, USA. doi:10.1109/APEC39645.2020.9124491
- Eskandari, R., Babaei, E., Sabahi, M., & Ojaghkandi, S. R. (2020). Interleaved high step-up zero-voltage zero-current switching boost DC-DC converter. *IET Power Electronics*, 13(1), 96-103. doi:10.1049/iet-pel.2019.0134
- Forouzesh, M., Siwakoti, Y. P., Gorji, S. A., Blaabjerg F., & Lehman, B. (2017). Step-up dc-dc converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(12), 9143-9178. doi:10.1109/TPEL.2017.2652318
- Genc, N., & Koc, Y. (2017). Experimental verification of an improved soft-switching cascade boost converter. *Electric Power Systems Research*, 149, 1-9. doi:10.1016/j.epsr.2017.04.015
- Gopi, A., & Saravanakumar, R. (2014). High step-up isolated efficient single switch DC-DC converter for renewable energy source. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(4), 1115-1127. doi:10.1016/j.asej.2014.05.001
- Guo, F., Wen, C., Mao, J., Chen J., & Song, Y. (2015). Distributed cooperative secondary control for voltage unbalance compensation in an islanded microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(5), 1078-1088. doi:10.1109/TII.2015.2462773
- Hai-Bo, Y., & Kim, Y. B. (2021). Compensated active disturbance rejection control for voltage regulation of a DC-DC boost converter. *IET Power Electronics*, 14(2), 432-441. doi:10.1049/pel2.12049
- Kobaku, T., Jeyasenthil, R., Sahoo, S., Ramchand, R., & Dragicevic, T. (2021). Quantitative feedback design-based robust pid control of voltage mode controlled dc-dc boost converter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(1), 286-290. doi:10.1109/TCSII.2020.2988319
- Lange, A. D. B., Soeiro, T. B., Ortmann M. S., & Heldwein, M. L. (2014). Three-level single-phase bridgeless pfc rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(6), 2935-2949. doi:10.1109/TPEL.2014.2322314
- Padmanaban, S., Kabalci, E., Iqbal, A., Abu-Rub, H., & Ojo, O. (2015). Control strategy and hardware implementation for DC-DC boost power circuit based on proportional-integral compensator for high voltage application. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(2), 163-170. doi:10.1016/j.jestch.2014.11.005
- Pavlovský, M., Guidi G., & Kawamura, A. (2014). Buck/boost dc-dc converter topology with soft switching in the whole operating region. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2), 851-862. doi:10.1109/TPEL.2013.2258358
- Rashid, M. H. (2004). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (3<sup>rd</sup> Ed.). New Jersey, USA: Pearson Education.
- Rosas-Caro, J. C., Mayo-Maldonado, J. C., Valdez-Resendiz, J. E., & Valderrabano-Gonzalez, A. (2018). *The resonant DC-DC multilevel boost converter*. 2018 International Conference on



- Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP), Cholula, Mexico. doi:[10.1109/CONIELECOMP.2018.8327190](https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2018.8327190)
- Theunisse, T. A. F., Chai, J., Sanfelice, R. G., & Heemels, W. P. M. H. (2015). Robust global stabilization of the dc-dc boost converter via hybrid control. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 62(4), 1052-1061. doi:[10.1109/TCSI.2015.2413154](https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2413154)
- Wai, R. J., & Duan, R. Y. (2005). High-efficiency DC/DC converter with high voltage gain. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 152(4), 793-802. doi:[10.1049/ip-epa:20045067](https://doi.org/10.1049/ip-epa:20045067)
- Wang, C. M., Lin, C. H., Hsu, S. Y., Lu, C. M. & Li, J. C. (2014). Analysis, design and performance of a zero-current-switching pulse-width-modulation interleaved boost dc/dc converter. *IET Power Electronics*, 7(9), 2437-2445. doi:[10.1049/iet-pel.2013.0510](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0510)
- Yang, L., Wu, B., Zhang, X., Smedley K., & Li, G.-P. (2017). Dynamic modeling and analysis of constant on time variable frequency one-cycle control for switched-capacitor converters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 64(3), 630-641. doi:[10.1109/TCSI.2016.2618893](https://doi.org/10.1109/TCSI.2016.2618893)
- Yao, Z., & Xiao, L. (2013). Family of zero-voltage-switching unregulated isolated step-up DC-DC converters. *IET Power Electronics*, 6(5), 862-868. doi:[10.1049/iet-pel.2012.0714](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2012.0714)



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<http://dergipark.gov.tr/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Farklı Dalgacık Dönüşümü Türleri Kullanılarak COVID-19'un Olay İlişkili P300 Potansiyeli Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

**Onur Erdem KORKMAZ**

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 25240, Erzurum, Türkiye

Onur Erdem KORKMAZ, [ORCID No: 0000-0001-6336-6147](https://orcid.org/0000-0001-6336-6147)

Sorumlu yazar e-posta: [onurerdem.korkmaz@atauni.edu.tr](mailto:onurerdem.korkmaz@atauni.edu.tr)

#### Makale Bilgileri

Geliş: 01.12.2022  
Kabul: 13.03.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1212844](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1212844)

#### Anahtar Kelimeler

Beyin-bilgisayar arayüzü,  
COVID-19,  
Dalgacık dönüşümü,  
EEG

**Öz:** COVID-19'un nörolojik ve mikrovasküler sistem üzerinde etkileri bulunmaktadır. Bu bilgiden hareketle bu çalışmada COVID-19 öncesi ve COVID-19 sonrası aynı kişiler ve aynı deney prosedürüyle kaydedilmiş EEG sinyallerinden elde edilen olay ilişkili potansiyeller karşılaştırılmıştır. Farklı dalgacık dönüşümü türleri kullanılarak elde edilen spektrogram görüntüleri Cz, P3, P4, Pz, P7, P8, O1, Oz ve O2 kanalları kullanılarak COVID-19 öncesi ve COVID-19 sonrası durumları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, 4 Hz frekans bölgesi ve 100 ile 300 ms zaman bölgesi arasında Oz, P8, P7 ve P4 elektrotlarında bir aktivasyon azalmasının meydana geldiği görülmektedir. Farklılığın daha net ortaya konulabilmesi için, farklı dalgacık türleri kullanılarak elde edilen güç katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. COVID-19 sonrası en büyük azalma oranı %16.10 ile bump dalgacık türünde meydana gelmiştir. Morse ve amor dalgacık türleri içinse sırasıyla %14.22 ve %14.25'lik dalgacık dönüşümü katsayısı güç azalması meydana gelmiştir. Kanallar açısından en büyük farklılık Oz kanalında meydana gelmiştir.

### Investigation of the Effect of COVID-19 on Event-Related P300 Potential Using Different Types of Wavelet Transforms

#### Article Info

Received: 01.12.2022  
Accepted: 13.03.2023  
Online August 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1212844](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1212844)

#### Keywords

Brain-computer interface,  
COVID-19,  
EEG,  
Wavelet transform

**Abstract:** COVID-19 has effects on the neurological and microvascular systems. Based on this information, in this study, event-related potentials were compared from EEG signals recorded by the same people and the same experimental procedure before and after COVID-19. The spectrogram images obtained using different wavelet transform types were compared using the Cz, P3, P4, Pz, P7, P8, O1, Oz, and O2 channels before and after COVID-19. When the results are examined, it is seen that there is a decrease in activation in the Oz, P8, P7, and P4 electrodes between the 4 Hz frequency region and the 100 to 300 ms time region. In order to reveal the difference more clearly, the power coefficient values obtained by using different wavelet types were compared. The most significant reduction rate after COVID-19 occurred in the bump wavelet type, with 16.10%. For Morse and amor wavelet types, wavelet transform coefficient power reduction of 14.22% and 14.25%, respectively, occurred. The most significant difference in terms of channels occurred in the Oz channel.

## 1. Giriş

Dünyada ilk kez Aralık 2019'da Çin'in Wuhan kentinde tespit edilen COVID-19, hızla yayılmış ve dünyanın her yerinden milyonlarca insana bulaşmıştır. Dünya Sağlık Örgütü, 11 Mart 2020'de küresel sağlık acil durumu ve pandemi ilan etmiştir. Virüsün kalp, akciğerler, solunum yolu epiteli, endotel hücreleri ve beyne zarar verdiği yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (Hashimoto ve ark., 2022). Öte yandan, COVID-19 karantinası çeşitli sosyal ve ekonomik sorunlara neden olmuştur (Ashraf & Goodell, 2022; Flor ve ark., 2022).

COVID-19 virüsünün sosyal yaşam biçimleri ve insan sağlığı üzerindeki etkileri araştırmacıların ana hedef noktasını oluşturmaktadır. Örneğin, Kontoangelos ve arkadaşlarının 65'ten fazla makale taraması yaparak yaptıkları derleme çalışmasında, COVID-19 virüsünün çocuklar üzerinde endişe, korku ve ilerleyen dönemlerde çeşitli sağlık sorunları çıkarabileceğini söylemişlerdir. Çalışmada yaşlı kişilerin hayata karşı düşüncelerinin olumsuz manada etkilendiğini ve daha savunmasız hale geldiklerini belirtmişlerdir. Aynı çalışmada son olarak sağlık çalışanlarının hem fiziksel hem de psikolojik açıdan ağır baskı altında çalışmak durumunda kaldıkları belirtilmiş bununda ilerde ciddi sağlık sorunlarına sebebiyet vereceği belirtilmiştir (Kontoangelos ve ark., 2020). Başka bir sosyal problem temelli çalışmada ise Satre ve arkadaşları, karantina döneminde alkol tüketiminin arttığına dikkat çekmişlerdir (Satre ve ark., 2020). Delussi ve arkadaşları ise COVID-19 karantinasının insan stres seviyesini yükselttiğini, dolayısıyla migren sıklığını ve şiddetini artırdığını bildirmişlerdir (Delussi ve ark., 2020).

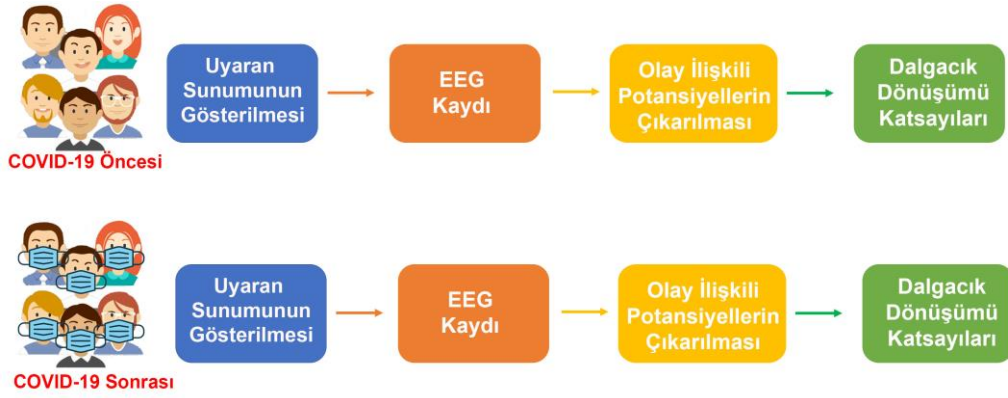
COVID-19 enfeksiyonu insanlarda sosyal sorunların yanında uzun veya kısa süreli ciddi klinik semptomlara yol açabilmektedir. Hastaneye yatırılan birçok hastada solunum yetmezliği, baş ağrısı, koku kaybı ve felce kadar değişen nörolojik belirtiler görülmüştür (Iadecola ve ark., 2020). Yapılan bir diğer çalışmada ise Azevedo ve arkadaşları, artan miyokard enfarktüsü riski, deprese sistolik sol ventrikül fonksiyonu ile hızla gelişen fulminan miyokardit, aritmiler, venöz tromboembolizm ve STEMI sunumlarını taklit eden kardiyomiyopatiler, COVID-19 hastalarında tanımlanan en yaygın kardiyovasküler komplikasyonlar olduğunu bildirmişlerdir (Azevedo ve ark., 2021). Literatürde yapılan bir çalışmada ise Ciceri ve arkadaşları COVID-19 virüsünün beyin, kalp ve diğer hayati öneme sahip organların mikrovasküler yatağını etkileyerek çoklu organ yetmezliğine ve buna bağlı ölümlere neden olabileceğini açıklamışlardır (Ciceri ve ark., 2020). Yapılan literatür araştırması sonucunda COVID-19'un nörolojik, kardiyovasküler sistem ve mikrovasküler yatak üzerinde olumsuz etkiler bıraktığı görülmektedir.

Olay ilişkili potansiyeller (OİP), beynin alakasız uyarıcı dizileri arasında alakalı uyarana verdiği tepki olarak tanımlanmaktadır ve bilişsel sürecin bir parçası olarak görülmektedir (Brandeis & Lehmann, 1986; Hansenne, 2000). Dolayısıyla olay ilişkili potansiyeller üzerinde meydana gelen değişiklikler bilişsel süreçle ilişkilendirilebilmektedir (Zhang, 2020). COVID-19'un nörolojik ve mikrovasküler sistem üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, bilişsel fonksiyonlar üzerinde etki bıraktığı düşünülebilir. Bu bilgiden hareketle gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında katılımcıların COVID-19 geçirmeden önceki ve COVID-19 geçirdikten sonraki kaydedilen EEG sinyalleri ile elde edilen OİP'ler farklı dalgacık dönüşümü metotları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, COVID-19 sonrası OİP'lere ait dalgacık katsayı güçlerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca COVID-19 öncesi ve sonrası dalgacık dönüşümü sonuçları görsel açıdan karşılaştırılmış, yine enfeksiyon sonrasında çoğu kanalda aktivasyon azalmasının meydana geldiği görülmüştür.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Veri seti tanıtımı

Çalışma kapsamında COVID-19 vakaları ülkemizde görülmeden çok kısa zaman önce katılımcılarla beyin bilgisayar arayüzü (BBA) deneyi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ülkemizde COVID-19 vakaları görülmeye başlamış ve katılımcılarımızdan bazıları COVID-19'a yakalanmıştır. Vakalar öncesi kayıt aldığımız katılımcılardan COVID-19 testi pozitif çıkanlarla aynı deney prosedürü ile tekrar veri alınmıştır. Böylelikle COVID-19 öncesi ve COVID-19 sonrası aynı deney prosedürü ile kaydedilmiş EEG veri seti elde edilmiştir. Çalışmaya ait blok diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Çalışmaya ait blok diyagram.

Yaşları 26 ile 46 arasında değişen toplam altı katılımcı ile deneyler gerçekleştirilerek EEG veri seti kaydedildi. Katılımcıların hiçbiri daha önce böyle bir deneye katılmadı ve görme dahil herhangi bir hastalıklarının olmadıklarını bildirdiler. Veri toplama süreci Atatürk Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Etik Kurulu tarafından onaylandı ve EEG kaydı başlamadan önce tüm katılımcılar onam formunu imzaladılar. COVID-19 tanısı öncesi ve sonrası olmak üzere iki farklı oturumda EEG sinyalleri kaydedildi. COVID-19 enfeksiyonu geçirmeden önce katılımcılardan alınan EEG kayıtlarının kesin tarihleri ile enfeksiyon tanı tarihleri Çizelge 1.'de verilmiştir. Katılımcılarla tanı tarihinden 15-20 gün sonra ikinci oturum EEG veri kaydı alınmıştır.

Çizelge 1. Birinci oturum kayıt ve tanı tarihleri

Katılımcı	Cinsiyet	Yaş	COVID-19 Öncesi Birinci Oturum EEG Kayıt Tarihi	COVID-19 Tanısı Konma Tarihi
Kişi 1	E	30	07.04.2020	02.11.2020
Kişi 2	K	26	17.04.2020	02.11.2020
Kişi 3	E	46	07.07.2020	07.10.2020
Kişi 4	K	27	07.06.2020	30.10.2020
Kişi 5	K	35	06.06.2020	10.12.2020
Kişi 6	E	29	25.06.2020	29.11.2020

## 2.2. Paradigma

Bu çalışmada, ilk olarak Donchin ve arkadaşları tarafından önerilen satır-sütun flaşlanması tabanlı görsel paradigma kullanılmıştır (Farwell & Donchin, 1988). Bu paradigmada katılımcıya öncelikle Şekil 2.a'da gösterildiği gibi 6x6'lık bir matris içerisindeki harf ve rakamlardan oluşan karakter seti gösterildi. Daha sonra Şekil 2.b'de gösterildiği gibi bu karakter setinden bir tanesi 'hedef karakter' olarak gösterildikten sonra Şekil 2.c ve d'de gösterildiği gibi her defasında bir satır ve bir sütun olacak şekilde flaşlanma işlemi gerçekleştirildi. 6 satır ve 6 sütunun tamamının flaşlanmasına bir 'deneme' denilir ve bir deneme toplam 12 (6+6) flaşlanmadan oluşmaktadır. Bir deneme flaşlanmasının 15 kez tekrar edilmesine de 'koşum' denilmektedir ve bir koşum toplam 180 (12\*15) flaşlanmadan oluşmaktadır.

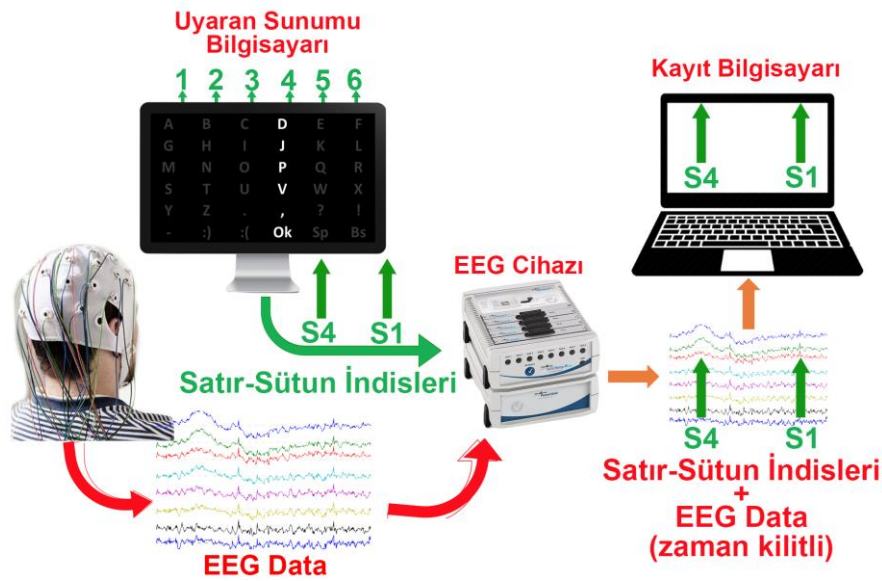


Şekil 2. Satır sütun flaşlanma paradigması.

Deneyler sırasında her bir katılımcıya toplam 85 harf hedef karakter olarak gösterildi. Katılımcılardan hedef karaktere ait satır veya sütun flaşlanmalarını içerlerinden sessizce saymaları istendi.

### 2.3. EEG kaydı

EEG kaydı alınırken Brain Product markasına ait ActiChamp model EEG cihazı kullanıldı. Elektrotlar uluslararası 10/20 sistemine göre yerleştirildi ve unipolar EEG kayıtları yapıldı. Kullandığımız cihaz özelliğinden kaynaklı referans elektrotu olarak her iki hemisfere eşit uzaklıktaki 'F2' kanalı kullanıldı ve örnekleme frekansı 250 Hz olarak belirlendi. Deneylerde kullanılan kayıt sistemi iki bilgisayar ve bir EEG cihazından oluşmaktadır. EEG cihazı, elektrotlardan alınan EEG verilerini görsel uyarın sunumunun yapıldığı bilgisayar tarafından gönderilen satır-sütun indisleriyle birleştirerek ikinci bilgisayarda çalışan kayıt yazılımına zaman kilitli bir şekilde gönderir. Sonuç olarak, EEG verileri ve görsel uyarın tipi eşzamanlı bir şekilde kaydedilir. Tüm veri toplama blok şeması Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Veri toplama prosedürü.

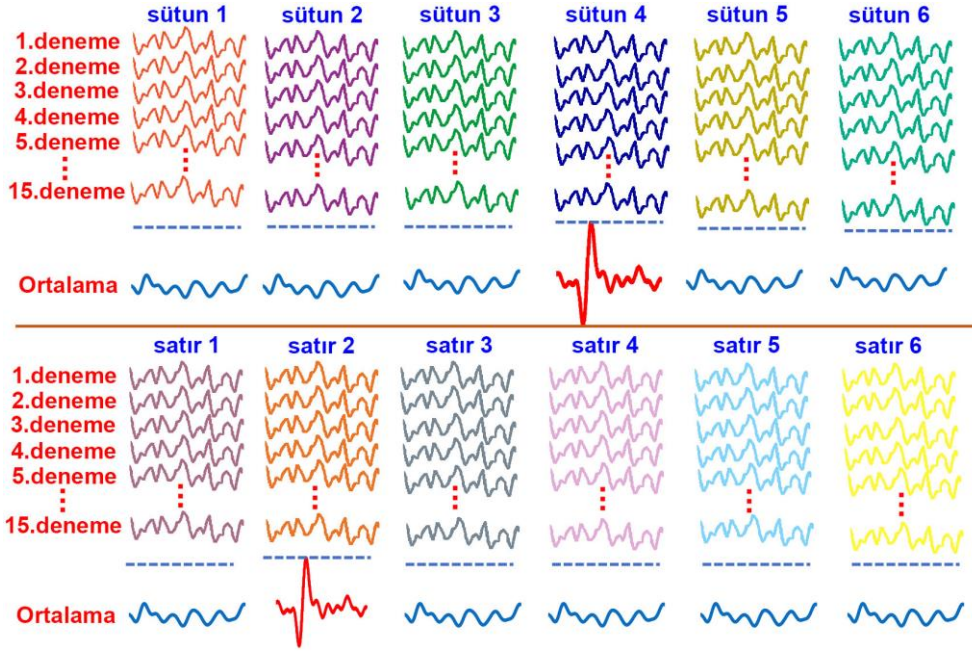
### 2.4. Olay ilişkili potansiyellerin çıkarılması

Olay ilişkili potansiyellerin çıkarılması adımıyla öncelikle kaydedilen EEG verisine 0.1-10 Hz bant geçiren filtre uygulanmıştır. OİP'ler düşük frekans bileşenlerine sahip olduğundan bu filtre değeri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır (Rakotomamonjy & Guigue, 2008). Daha sonra EEG verileri hedef uyarana ait ve hedef uyarana ait olmayan parçalar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Altı satır ve altı sütun flaşlanması içerisinden hedef karakterin bulunduğu satır ve sütun flaşlanmasına ait iki flaşlanma sonucunda ortaya çıkan EEG sinyali diğer on satır ve sütun flaşlanmalarından farklıdır. Hedef karaktere ait satır ve sütun flaşlanması sonucunda elde edilen EEG sinyallerinde OİP'ler yer alırken diğer on satır sütun flaşlanmasında OİP'ler yer almamaktadır. Ancak tek bir flaşlanma sonucu elde edilen OİP'lerin işaret-gürültü oranı oldukça düşüktür. Bunun için hedef karaktere ait birden fazla satır ve sütun flaşlanmasına ait EEG parçalarının ortalaması alınarak işaret-gürültü oranı yüksek OİP sinyali elde edilmektedir. Gerçekleştirilen bu deney kapsamında toplam 12 satır-sütun flaşlanması 15 kez tekrar edilerek toplam 180 flaşlanma (12\*15) işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te örnek bir OİP elde edilme adımları gösterilmiştir. Şekle göre her bir satır ve sütun flaşlanmasından sonraki ilgili bir saniyelik EEG parçaları alt alta eklenmiştir.

Şekil 4'te örnek olarak katılımcıya 'J' harfi hedef olarak gösterilmiştir. Şekil 2.a'dan da görüleceği gibi J harfi 4.sütun ve 2.satırda yer almaktadır. Şekil 4'te 15 adet satır ve sütun flaşlanmalarının ortalaması alındığında 4. sütun ve 2. satıra ait EEG parçaların ortalamasından OİP



elde edildiği, diğer sütun ve satır flaşlanmalarına ait ortalamalardan OIP elde edilemediği görülmektedir.



Şekil 4. Olay ilişkili potansiyellerin elde edilmesi.

## 2.5. Dalgacık dönüşümü katsayılarının elde edilmesi

Dalgacık dönüşümü zaman-frekans lokalizasyonu sağlaması açısından önemli bir yöntemdir. Dalgacık analizinin en önemli noktası, uygun bir dalgacık fonksiyonunun seçimidir. Ayrıca dalgacık fonksiyonunun ve analiz edilecek sinyallerin benzerliği, faydalı bilgiler elde etmek için önemlidir (Aydemir & Kayıkcıoğlu, 2011).

Sürekli dalgacık dönüşümü (SDD), orijinal  $x(t)$  sinyali ile  $\psi(\tau, s)$  (t) dalgacık fonksiyonunun konvolüsyonu olarak tanımlanmaktadır ve Eşitlik 1 ile gösterilmektedir;

$$SDD_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (1)$$

eşitlikte  $\psi_{(\tau,s)}(t)$ ,  $\psi(t)$  dalgacık fonksiyonunun genişleme ve kaydırılma miktarını göstermektedir ve Eşitlik 2'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır;

$$\psi_{(\tau,s)}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left( \frac{t - \tau}{s} \right) \quad (2)$$

burada t,  $\tau$  ve s sırasıyla zaman, öteleme ve ölçekleme parametrelerini göstermektedir (Adeli ve ark., 2003). Dalgacık dönüşümü katsayılarının genlik kareleri toplamları (dalgacık dönüşümü katsayıları gücü, DDKG) Eşitlik 3'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır;

$$DDKG = \sum_{i=1}^n |w_i|^2 \quad (3)$$

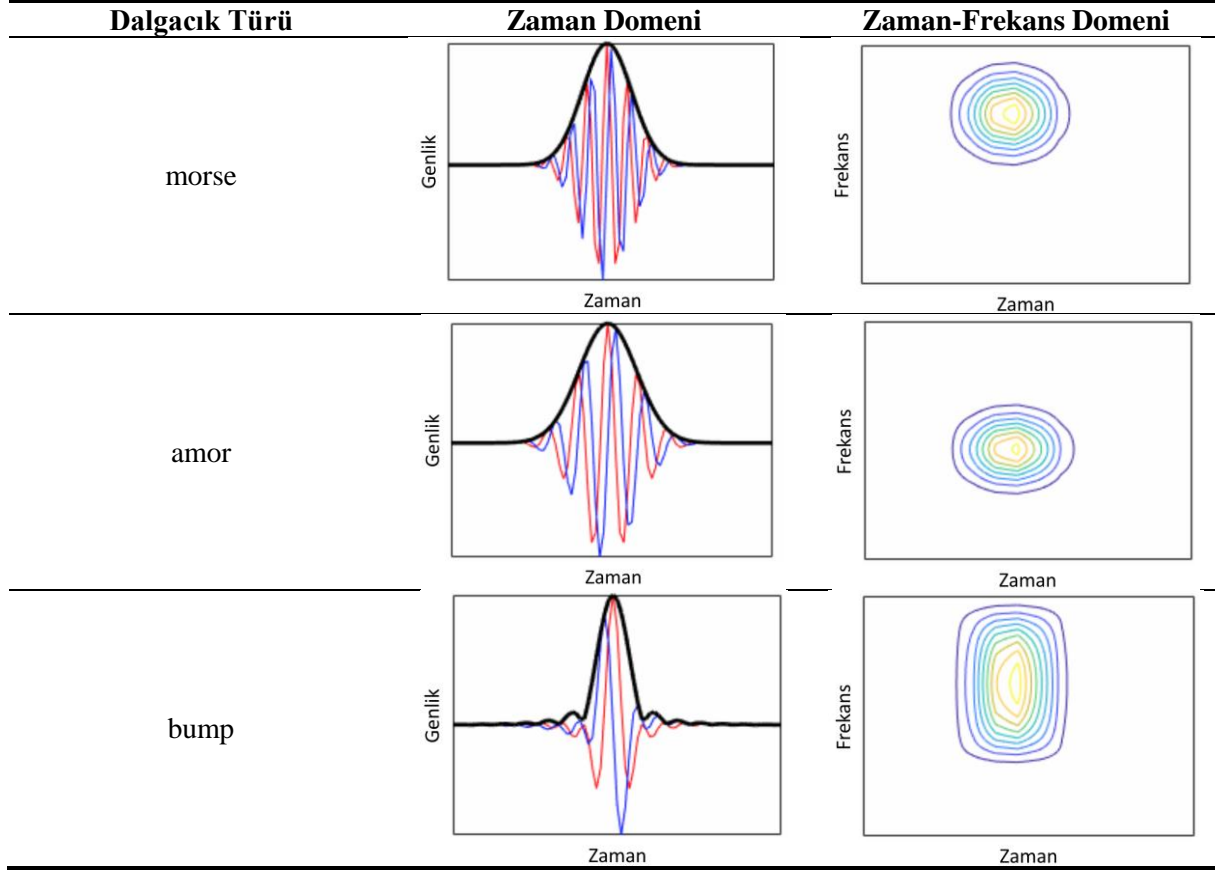
eşitlikte  $w_i$ , i. dalgacık dönüşümü katsayısını, n ise toplam dalgacık katsayısını göstermektedir.

Çalışma kapsamında kullanılan dalgacık türleri ve bu dalgacık türlerine ait zaman, zaman-frekans domeni özelliklerini gösterir grafikler Çizelge 2.'de gösterilmiştir.



Morse dalgacık türünde zaman ve frekans yayılımını değiştirmek için iki parametreyi değiştirebilir iken amor dalgacık türünde zaman ve frekansta eşit varyansa sahiptir. Bump dalgacık türü ise zaman ekseninde daha geniş varyans, frekans ekseninde daha dar varyansa sahiptir.

Çizelge 2. Farklı dalgacık türlerine ait zaman, zaman-frekans domeni özellikleri

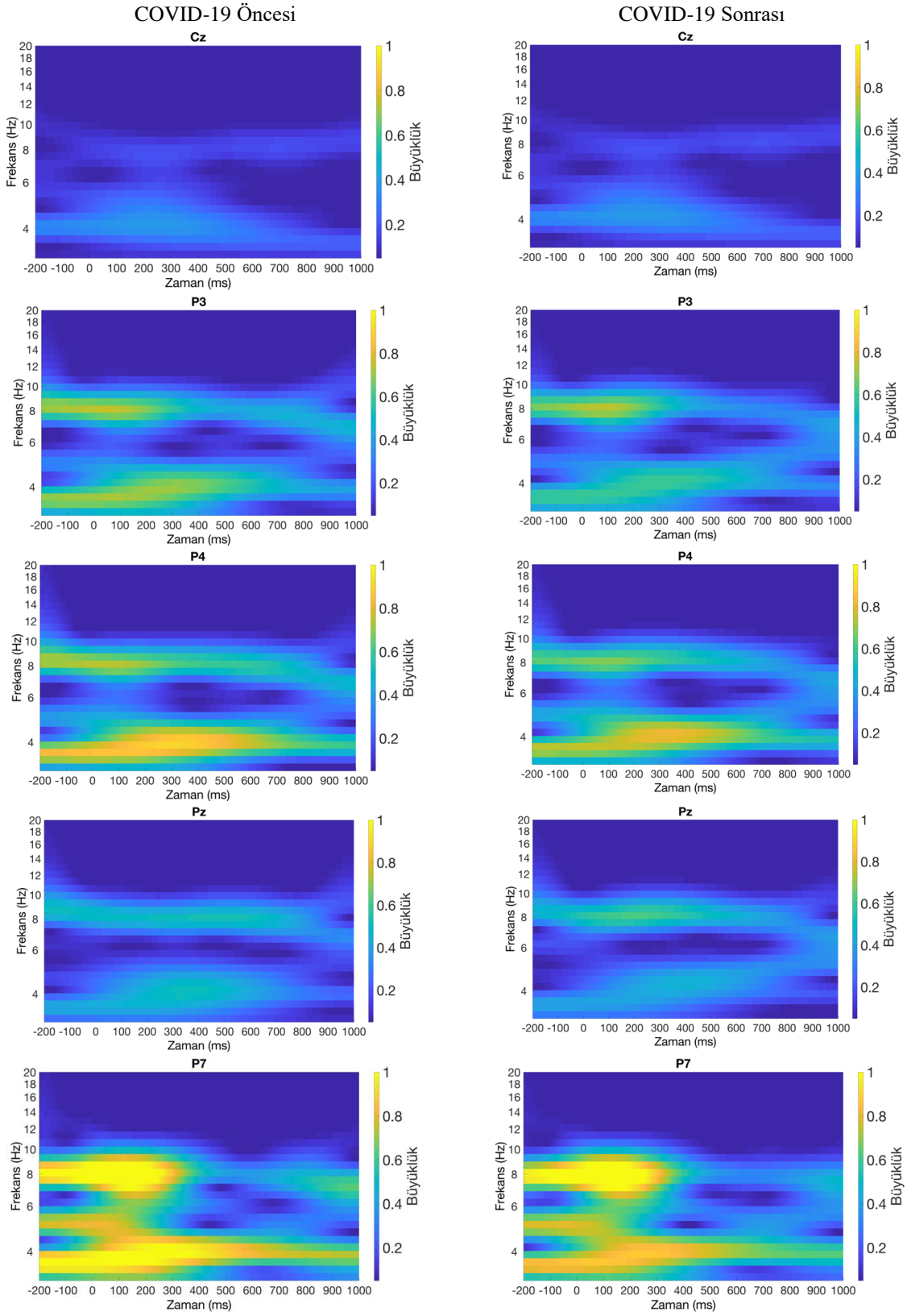


### 3. Bulgular

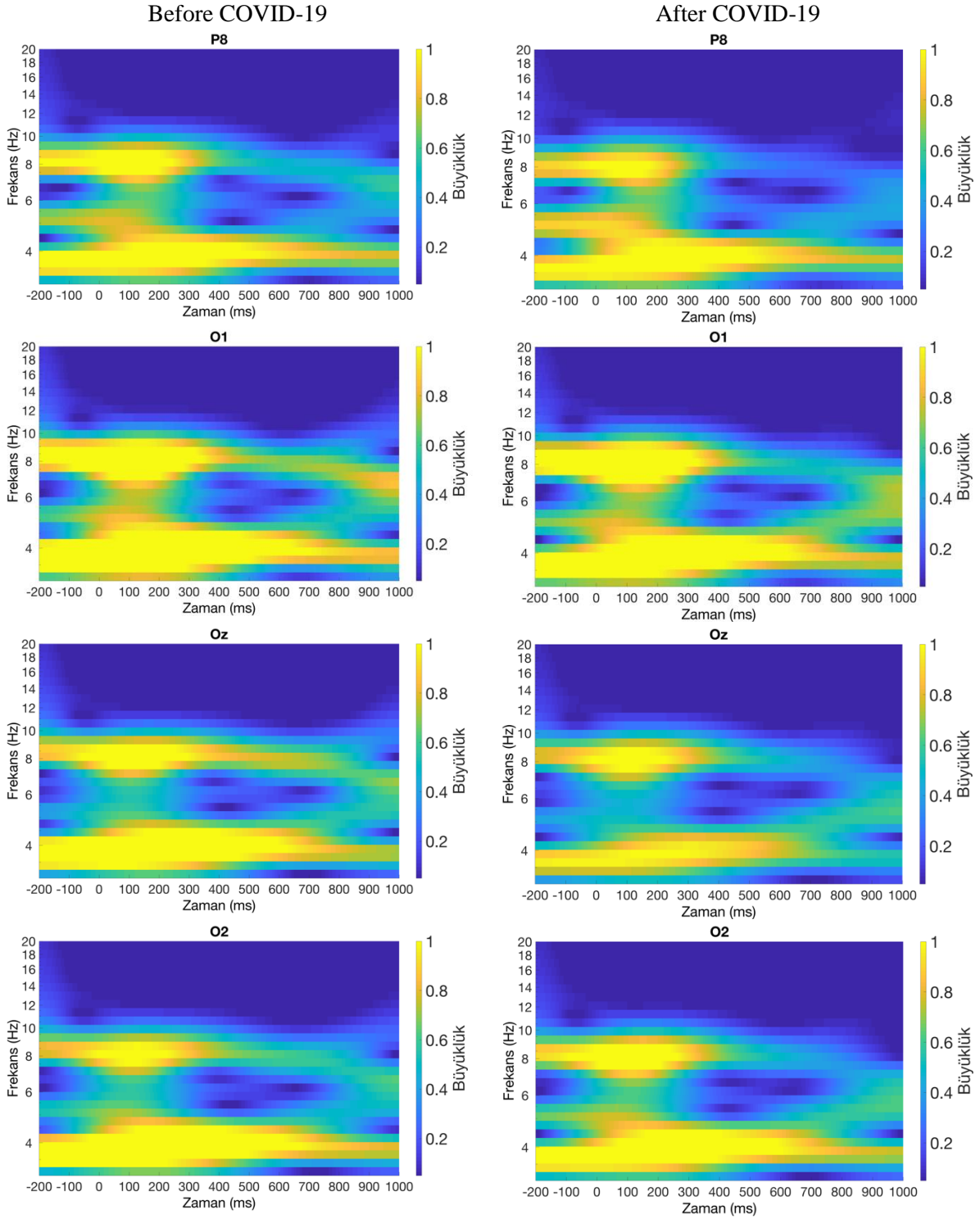
Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, görsel uyarıların çoğunlukla oksipital, parietal ve sentral bölgede aktivasyon meydana getirdiği görülmektedir. (Brouwer & Van, 2010; Jin vd., 2012; Jin vd., 2020). Bu çalışmada görsel uyarıların sonucu COVID-19 öncesi ve sonrasında oluşan olay ilişkili P300 potansiyeli karşılaştırıldığından sentral (Cz), parietal (P3, P4, Pz, P7 ve P8), ve oksipital (O1, Oz ve O2) bölge elektrotları kullanılarak karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir.

Çalışma kapsamında hem COVID-19 öncesi hem de COVID-19 sonrası kaydedilen EEG sinyallerinden elde edilen OİP'ler Cz, P3, P4, Pz, P7, P8, O1, Oz ve O2 kanalları kullanılarak elde edilen dalgacık dönüşümü katsayılarıyla hem görsel açıdan hem de DDKG açısından karşılaştırılmıştır. Öncelikle Şekil 5 ve Şekil 6'da morse dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilen spektrogram görüntüleri COVID-19 öncesi ve COVID-19 sonrası durumları için görsel açıdan karşılaştırılmıştır. Grafiklerde yer alan koyu mavi, açık mavi, yeşil ve sarı renklerle gösterilen bölgeler 0'dan 1'e kadar değişen genlik değerini göstermektedir. Genlik değerleri ve renkler grafiğin yan tarafında bulunan barda görülmektedir. Koyu mavi yaklaşık 0 genlik değerini ve sarı renk ise yaklaşık 1 genlik değerini göstermektedir. Grafikler kabaca değerlendirildiğinde COVID-19 öncesi genlik değerlerinin özellikle 4 Hz frekans bölgesinde daha yüksek olduğu bu bölgenin daha açık renkte olmasından (daha açık sarı yada daha açık mavi) anlaşılmaktadır. Örneğin Oz kanalı ele alındığında, COVID-19 öncesi elde edilen dalgacık dönüşümü grafiğinde 4 Hz dolaylarında elde edilen OİP sinyalinin genliğinin COVID-19 sonrası elde edilen OİP sinyalinin genliğinden daha yüksek olduğu o bölgenin daha açık sarı renkte olmasından anlaşılmaktadır. Benzer şekilde özellikle 100-300 ms dolaylarında COVID-19 öncesi elde edilen OİP sinyallerinin dalgacık dönüşümü grafiklerinde daha

açık mavi renkte ya da daha açık sarı renkte olmasından anlaşılmaktadır. Bu bilgiler ışığında incelenen grafiklerden de görüleceği üzere



Şekil 5. Cz, P3, P4, Pz ve P7 kanalları için dalgacık dönüşümü sonuçları.



Şekil 6. P8, O1, Oz ve O2 kanalları için dalgacık dönüşümü sonuçları.

özellikle 4 ile 8 Hz frekans bölgesinde ve 100 ile 300 ms zaman bölgesinde aktivasyonun arttığı görülmektedir. COVID-19 öncesi ve sonrası arasındaki fark en fazla 4 Hz frekans bölgesi ve 100 ile 300 ms zaman bölgesi arasında görülmektedir.

Şekil 5 ve Şekil 6'daki spektrogram grafiklerinden görüleceği üzere, COVID-19 sonrası özellikle Oz, P8, P7 ve P4 elektrotlarında bir aktivasyon azalması meydana gelmiştir. Farklılığın daha net ortaya konulabilmesi adına farklı dalgacık türleri açısından DDKG değerleri karşılaştırılmıştır ve bu değerler Çizelge 3'te yer almaktadır.

Çizelge 3 incelendiğinde her üç dalgacık türü içinde COVID-19 sonrası ortalama dalgacık katsayısı güç değerinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir. En büyük ortalama azalma oranı %16.10 ile bump dalgacık türünde meydana gelmiştir, morse ve amor dalgacık türleri içinse sırasıyla %14.22 ve 14.25'lik DDKG azalması meydana gelmiştir. Cz kanalı dışındaki tüm kanallarda COVID-19 sonrası bir DDKG azalması meydana gelmiştir, Cz kanalında ise her üç dalgacık türünde de artış gözlemlenmiştir. Kanal bazında en büyük farklılık Oz'de meydana gelmiştir. Morse, amor ve bump dalgacık türlerinde Oz kanalı için sırasıyla %58.24, %58.25 ve % 35.82'lik bir azalma meydana gelmiştir. En düşük azalma oranı ise Pz kanalında görülmektedir. Yine P7 kanalında da morse, amor ve bump dalgacık türleri için sırasıyla %20.97, %21.23 ve % 21.71 azalma oranı görülmekte, bu fark da dikkate değerdir.

Çizelge 3. COVID-19 öncesi ve sonrası farklı dalgacık türlerine ait DDKG değerleri

Kanallar	Morse			Amor			Bump		
	COVID-19 Öncesi	COVID-19 Sonrası	Azalma Oranı (%)	COVID-19 Öncesi	COVID-19 Sonrası	Azalma Oranı (%)	COVID-19 Öncesi	COVID-19 Sonrası	Azalma Oranı (%)
Cz	131.91	171.86	-23.25	170.38	222.33	-23.37	9.08	10.63	-14.58
P3	892.33	737.05	21.07	1161.43	958.73	21.14	129.4	108.52	19.24
P4	1230.87	1036.98	18.70	1595.11	1344.21	18.67	154.85	121.09	27.88
Pz	531.91	523.88	1.53	687.63	679.13	1.25	97.49	105.27	-7.39
P7	2127.3	1758.6	20.97	2788.21	2299.98	21.23	246.19	202.27	21.71
P8	2228.23	2065.92	7.86	2907.52	2694.76	7.90	266.55	172.05	54.93
O1	3552.81	3089.7	14.99	4639.65	4027.01	15.21	451.66	400.25	12.84
Oz	2698.12	1705.03	58.24	3514.87	2221.09	58.25	340.63	250.8	35.82
O2	2595.12	2405.44	7.89	3379.43	3129.12	8.00	272.75	288.73	-5.53
		<b>Ortalama</b>	<b>14.22</b>		<b>Ortalama</b>	<b>14.25</b>		<b>Ortalama</b>	<b>16.10</b>

#### 4. Sonuç

COVID-19'enfeksiyonun insanlarda sosyal sorunların yanında, nörolojik, kardiyovasküler sistem ve mikrovasküler yatak üzerinde olumsuz etkileri gibi uzun veya kısa süreli ciddi klinik semptomlara yol açtığı yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. COVID-19'un nörolojik ve mikrovasküler sistem üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, bilişsel fonksiyonlar üzerinde etki bıraktığı düşünülerek Korkmaz ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada (Korkmaz ve ark., 2021) COVID-19 geçirmeden önce alınan EEG sinyalleri ile aynı kişilerle COVID-19 geçirdikten sonra aynı deney prosedürüyle EEG sinyalleri kaydedilerek COVID-19'un P300 tabanlı BBA sistem performansı üzerindeki etkileri sınıflandırma doğruluğu açısından karşılaştırılmıştır. Ancak bu çalışmada COVID-19'un OİP'ler üzerinde zaman, zaman-frekans açısından ne gibi farklılıklar meydana getirdiği açıkça belirtilmemiştir. Bu bilgiden hareketle gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında, Korkmaz ve arkadaşlarının kaydettikleri veri setindeki, katılımcıların COVID-19 geçirmeden önceki ve COVID-19 geçirdikten sonraki kaydedilen EEG sinyalleri ile elde edilen OİP'ler farklı dalgacık dönüşümü metotları kullanılarak hem spektrogram hem de DDKG açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre COVID-19 geçirdikten sonra elde edilen OİP sinyalleri aktivasyonunda bir azalma meydana geldiği görülmüş, özellikle Oz, P8, P7 ve P4 elektrotlarında bu fark daha da belirgindir. Farkın daha net ortaya koyulması amacıyla farklı dalgacık türlerine ait DDKG değerleri elde edilerek karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir. Elde edilen DDKG sonuçlarına göre morse, amor ve bump dalgacık türleri için COVID-19 sonrası sırasıyla ortalama %14.22, %14.25 ve %16.10 azalma meydana gelmiştir. Hem spektrogram hem de DDKG sonuçlarına göre COVID-19 sonrası OİP sinyallerinde aktivasyon azalması meydana gelmiştir. Özellikle Oz, P8, P7 ve P4 elektrotlarında bu fark daha da belirgindir. Parietal lobun insan beyninin mekânsal yön belirleme, tatları algılama, acı ve dokunma hisleri gibi işlevlerinden sorumlu olduğu, oksipital lobun görsel uyarıyı yorumlamadan (görsel algıdan) sorumlu olduğu düşünüldüğünde COVID-19 un görme, tat algılama, acı ve dokunma hislerinde değişiklik meydana getirebileceği düşünülebilir.

Elde edilen sonuçlara göre COVID-19 öncesi ve sonrası OİP sinyalleri arasında farklılıklar bulunmaktadır. OİP sinyallerinin bilişsel fonksiyonların çıktısı olduğu düşünüldüğünde, COVID-19'un insan beyni ve dolayısıyla bilişsel süreçler üzerinde etkisinin olduğu sonucuna varılmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FOA-2018-6524 proje numarası ile desteklenmiştir.

## Kaynakça

- Adeli, H., Zhou, Z., & Dadmehr, N. (2003). Analysis of EEG records in an epileptic patient using wavelet transform. *Journal of Neuroscience Methods*, 123(1), 69-87. doi:10.1016/S0165-0270(02)00340-0
- Ashraf, B. N., & Goodell, J. W. (2022). COVID-19 social distancing measures and economic growth: Distinguishing short-and long-term effects. *Finance Research Letters*, 47, 102639. doi:10.1016/j.frl.2021.102639
- Azevedo, R. B., Botelho, B. G., Hollanda, J. V. G. d., Ferreira, L. V. L., Junqueira de Andrade, L. Z., Oei, S. S. M. L., & Muxfeldt, E. S. (2021). Covid-19 and the cardiovascular system: A comprehensive review. *Journal of Human Hypertension*, 35, 4-11. doi:10.1038/s41371-020-0387-4
- Aydemir, O., & Kayikcioglu, T. (2011). Wavelet transform based classification of invasive brain computer interface data. *Radioengineering*, 20, 31-38.
- Brandeis, D., & Lehmann, D. (1986). Event-related potentials of the brain and cognitive processes: Approaches and applications. *Neuropsychologia*, 24(1), 151-168. doi:10.1016/0028-3932(86)90049-7
- Brouwer, A. M., & Van Erp, J. B. F. (2010). A tactile P300 brain-computer interface. *Frontiers in Neuroscience*, 4, 19. doi:10.3389/fnins.2010.00019
- Ciceri, F., Beretta, L., Scandroglio, A. M., Colombo, S., Landoni, G., Ruggeri, A., ..., & Zangrillo, A. (2020). Microvascular COVID-19 lung vessels obstructive thromboinflammatory syndrome (MicroCLOTS): an atypical acute respiratory distress syndrome working hypothesis. *Critical Care and Resuscitation*, 22(2), 95-97.
- Delussi, M., Gentile, E., Coppola, G., Prudenzano, A. M. P., Rainero, I., Sances, G., ..., & Tommaso, M. (2020). Investigating the effects of COVID-19 quarantine in migraine: An observational cross-sectional study from the Italian National Headache Registry (RiCe). *Frontiers in Neurology*, 11, 597881. doi:10.3389/fneur.2020.597881
- Farwell, L. A., & Donchin, E. (1988). Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 70(6), 510-523. doi:10.1016/0013-4694(88)90149-6
- Flor, L. S., Friedman, J., Spencer, C. N., Cagney, J., Arrieta, A., Herbert, M. E., ..., & Gakidou, E. (2022). Quantifying the effects of the COVID-19 pandemic on gender equality on health, social, and economic indicators: A comprehensive review of data from March, 2020, to September, 2021. *The Lancet*, 399(10344), 2381-2397. doi:10.1016/S0140-6736(22)00008-3
- Hansenne, M. (2000). The p300 cognitive event-related potential. I. Theoretical and psychobiologic perspectives. *Clinical Neurophysiology*, 30(4), 191-210. doi:10.1016/S0987-7053(00)00223-9
- Hashimoto, Y., Suzuki, T., & Hashimoto, K. (2022). Mechanisms of action of fluvoxamine for COVID-19: A historical review. *Molecular Psychiatry*, 27, 1898-1907. doi:10.1038/s41380-021-01432-3
- Iadecola, C., Anrather, J., & Kamel, H. (2020). Effects of COVID-19 on the nervous system. *Cell*, 183(1), 16-27. doi:10.1016/j.cell.2020.08.028
- Jin, J., Allison, B. Z., Kaufmann, T., Kübler, A., Zhang, Y., Wang, X., & Cichocki, A. (2012). The changing face of P300 BCIs: A comparison of stimulus changes in a P300 BCI involving faces, emotion, and movement. *PloS One*, 7(11), e49688. doi:10.1371/journal.pone.0049688

- Jin, J., Chen, Z., Xu, R., Miao, Y., Wang, X., & Jung, T. P. (2020). Developing a novel tactile P300 brain-computer interface with a cheeks-stim paradigm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 67(9), 2585-2593. doi:10.1109/TBME.2020.2965178
- Kontoangelos, K., Economou, M., & Papageorgiou, C. (2020). Mental health effects of COVID-19 pandemia: A review of clinical and psychological traits. *Psychiatry Investigation*, 17(6), 491-505. doi:10.30773/pi.2020.0161
- Korkmaz, O. E., Aydemir, O., Oral, E. A., & Ozbek, I. Y. (2021). Investigating the effect of COVID-19 infection on P300 based BCI application performance. *Traitement du Signal*, 38(6), 1767-1773. doi:10.18280/ts.380620
- Rakotomamonjy, A., & Guigue, V. (2008). BCI competition III: dataset II-ensemble of SVMs for BCI P300 speller. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(3), 1147-1154. doi:10.1109/TBME.2008.915728
- Satre, D. D., Hirschtritt, M. E., Silverberg, M. J., & Sterling, S. A. (2020). Addressing problems with alcohol and other substances among older adults during the COVID-19 pandemic. *The American Journal of Geriatric Psychiatry*, 28(7), 780-783. doi:10.1016/j.jagp.2020.04.012
- Zhang, X. (2020). The influences of brand awareness on consumers' cognitive process: An event-related potentials study. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 549. doi:10.3389/fnins.2020.00549





Research Article

## Failure of Gedikbulak K-12 School Building on October 23, 2011, in Van, Türkiye Earthquake

Halit Cenan MERTOL

Atılım University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, 06830, Ankara, Türkiye  
Halit Cenan MERTOL, ORCID No: 0000-0001-8058-5798  
Corresponding author e-mail: cenan.mertol@atilim.edu.tr

### Article Info

Received: 04.01.2023  
Accepted: 31.03.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1229265

### Keywords

10370 typical school building project,  
Collapse,  
Development and lap splice length,  
Failure sequence

**Abstract:** A major earthquake with a magnitude  $M_w = 7.2$  ( $M_L = 6.7$ ) occurred in the Eastern part of Türkiye on October 23, 2011. The ground motion had a measured peak ground acceleration of  $0.18 \times g$ . The earthquake damaged masonry and reinforced concrete structures ranging from minor cracking to total collapse. A 4-story reinforced concrete school building in Gedikbulak Village experienced total failure during this earthquake. This school building was a typical project (No: 10370) prepared by the Ministry of Education of Türkiye and this typical project was widely being used for the construction of school buildings in various locations throughout Türkiye. This paper explains the site observations of the Atılım University Reconnaissance Team carried out at the collapse site of the school building a few days after the main shock and detailed analysis with an emphasis on the reason for the failure of the school building. The analysis results indicated that the collapse happened due to the separation of the bottom of shear walls (in both x- and y-directions) from the foundation due to inadequate development and lap splice length of the plain reinforcing bars. Comments were made for existing school buildings to prevent any collapses in future earthquakes.

## 23 Ekim 2011 Van, Türkiye Depremi Sırasında Gedikbulak Okul Binasının Yıkılması

### Makale Bilgileri

Geliş: 04.01.2023  
Kabul: 31.03.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1229265

### Anahtar Kelimeler

10370 tipik okul binası projesi,  
Göçme,  
Göçme adımları sıralaması,  
Kenetlenme ve bindirme boyu

**Öz:** 23 Ekim 2011 tarihinde Türkiye'nin doğusunda  $M_w = 7,2$  ( $M_L = 6,7$ ) büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Yer hareketinin en yüksek yer ivmesi  $0.18 \times g$  olarak ölçülmüştür. Deprem, yığma ve betonarme yapılarda küçük çatlaklardan tamamen göçmeye kadar değişen hasarlara neden olmuştur. Bu depremde, Gedikbulak Köyü'ndeki 4 katlı betonarme okul binası tamamen yıkılmıştır. Bu okul binası Türkiye Cumhuriyeti Milli Eğitim Bakanlığı tarafından hazırlanan tipik bir projedir (No: 10370) ve bu tipik proje Türkiye'nin çeşitli yerlerinde okul binalarının yapımında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu makalede, Atılım Üniversitesi Keşif Takımının ana şoktan birkaç gün sonra okul binasının yıkıldığı yerde yaptığı saha gözlemleri ve okul binasının yıkılma nedenleri üzerinde durularak detaylı analizleri anlatılmaktadır. Analiz sonuçları göçmenin, düz donatı çubuklarının yetersiz kenetlenme ve bindirme boyu nedeniyle perde duvarların tabanının (hem x- hem de y- yönlerinde) temelden ayrılmasından kaynaklandığını göstermiştir. Yapılan inceleme ve analizler sonucunda benzer mevcut okul binalarının gelecekteki depremlerde yıkılmaması için önerilerde bulunulmuştur.

## 1. Introduction

An earthquake with a magnitude of  $M_w = 7.2$  ( $M_L = 6.7$ ) occurred at 13:41 on October 23, 2011, in Van, Türkiye. This city had a population of 1,022,000 in 2011. The earthquake's epicenter was located approximately 30 km north of Van city center as shown in Figure 1. The measured peak ground acceleration (PGA) was equal to  $0.18 \times g$  in the N-S direction. This station (Muradiye Station) was located 46 km northeast of the earthquake's epicenter. Details related to the ground motion data were provided by [Baran et al. \(2014\)](#). No closer measurement was obtained due to faulty equipment. The ground motion was felt within a 250 km radius of the epicenter. The officially declared life loss was 604 people and more than 4000 people were injured. The town of Ercis, located approximately 60 km north of Van city center, had the highest number of deaths and structural damages ([Baran et al., 2014](#)).

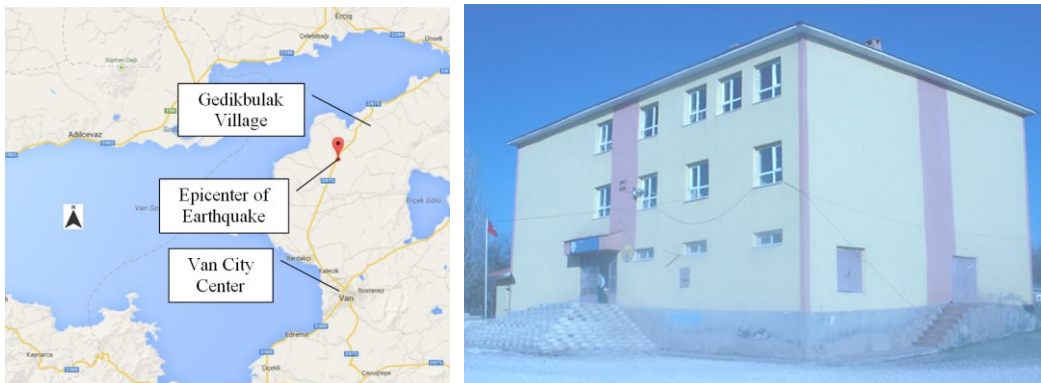


Figure 1. Location of the earthquake and photograph of school building before the earthquake.

Gedikbulak Village is located 47 km north of Van city center (between Van and Ercis) and 16 km northeast of the epicenter of the earthquake as shown in Figure 1. There were approximately 200 single or two story adobe masonry houses in the village. The only building made of reinforced concrete was the Gedikbulak K-12 School Building in the village. This school building was a typical project (No: 10370) prepared by the Ministry of Education of Türkiye and this typical project was widely being used for the construction of school buildings in various locations throughout Türkiye. Approximately 785 students were being educated in this building on a morning and afternoon session basis. The earthquake happened on a Sunday which prevented any life loss. However, there was a parents-teachers meeting on that day in the school which was luckily concluded one hour before the earthquake.

[İnel et al. \(2006\)](#) performed a study to evaluate the seismic performance of existing typical state buildings (hospitals and schools including 10370 typical school buildings) before the Van Earthquake in 2011. Based on the tests on concrete cores and Schmidt Hammer tests, the authors indicated that the state buildings constructed before 1998 had concrete strength ranging from 10 to 16 MPa and spacing of the transverse reinforcement ranging from 150 to 250 mm. Also, the authors observed that the steel reinforcement used in these buildings was S220 having a minimum yield strength of 220 MPa. The models of the buildings were subjected to pushover analysis, and the authors determined that the effect of poor concrete strength, low steel strength, and inadequate confinement were not significant in the seismic performance of the buildings having adequate shear walls.

[Tapan et al. \(2013\)](#) visited the damaged buildings after Van Earthquake. The authors also evaluated the Gedikbulak School. Based on on-site observations, it was concluded that the structural system looked adequate based on strength and stiffness subjected to moderate-level earthquakes. The collapse was associated with the deficiencies such as insufficient anchorage of the beam longitudinal reinforcement into the shear walls and inadequate lap splices of the longitudinal reinforcement of the shear walls. No detailed analysis was performed on the school building.

[Damcı et al. \(2015\)](#) presented their evaluations on the October 23, 2011, Van Earthquake. They also visited the Gedikbulak village and commented on the failure mechanisms based on their observations. It was concluded that faulty concrete production, defects in reinforcement details, and

the poor quality of craft were the reasons for the failure of the regional buildings. Again, no detailed analysis was performed on the school building.

Orak & Celep (2017) performed a study to assess the seismic performance of the Gedikbulak K-12 School Building. The authors visited the collapse site after the earthquake. The building was modelled and analyzed using linear and nonlinear analysis methods. It was concluded that the reasons for the collapse of the building were poor material quality, poor grading of aggregates in concrete, and improper detailing related to the connections between shear walls, beams, and slabs. Similar deficiencies were observed at the beam-column connections by the authors. Detailed analysis was performed on the school building. The shortcoming of this evaluation was additional shear walls in the short direction. These shear walls were modelled in the analysis by mistake and did not appear in the collapsed (actual) school building.

This paper investigates the reason for the collapse of the Gedikbulak K-12 School Building on October 23, 2011, Earthquake, which was the only reinforced concrete building in Gedikbulak village. Atilim University Reconnaissance Team carried out a site visit to the village a few days after the earthquake. Detailed field observations were made. Numerous photographs were shot, and videos were recorded. Without endangering human life, activities such as measuring structural elements, determining reinforcement details, and evaluating concrete properties were performed on-site. After the site visit, plans of this typical school building project were obtained, and the building was modeled using SAP2000 Structural Analysis Software. The analysis results and field observations were evaluated and commented on to avoid any future collapse of such typical buildings in future earthquakes. This study is the only one that focuses on the detailed failure analysis of the Gedikbulak K-12 School Building after the 2011 Van Earthquake.

## 2. Structural System of the Building

The school building consisted of 3 stories. A photograph of the building before the earthquake is shown in Figure 1. The formwork and reinforcement plan drawings of the building were obtained from the Ministry of Education of Türkiye.

This school building was designed based on provisions specified by Specification for Structures to be Constructed in Disaster Areas (Ministry of Public Works and Settlement [MPWS], 1975). It can be assumed that the building was designed based on a horizontal earthquake load of 15% of the total weight of the structure based on this code. Turkish Earthquake Code was revised three times later, in 1998, 2007, and 2018. The latest version is called the Building Earthquake Specifications of Türkiye (MPWS, 2018).

The length of the building in the long direction (north-south direction) was 21.9 m, and the short direction (east-west direction) was 14.7 m. Center to center distances between the outer columns were 21.6 and 14.4 m in long and short directions, respectively. The plan area of the building per floor was 322 m<sup>2</sup>, and the total area was 966 m<sup>2</sup>. The height of each story was 3.2 m, and the total height of the building was 9.6 m. A typical plan view of the school building is shown in Figure 2.

The structural system of the building was a reinforced concrete frame having shear walls in both directions. The total areas of the shear walls strong in north-south (SW1 and SW2) and east-west directions (SW3 and SW4) were 5.25 and 2.50 m<sup>2</sup>, respectively. The ratios of the area of the shear walls in north-south and east-west directions to the total area were 1.63% and 0.78%, respectively. Based on the drawings of the school building and site observations, the beams had 250×500, 250×700, 300×500, 300×700, and 400×700 mm, and the columns had 250×500, 300×500, and 400×500 mm dimensions. The thickness of the slab varied from 150 to 200 mm for typical floors and 200 mm for the whole roof floor.

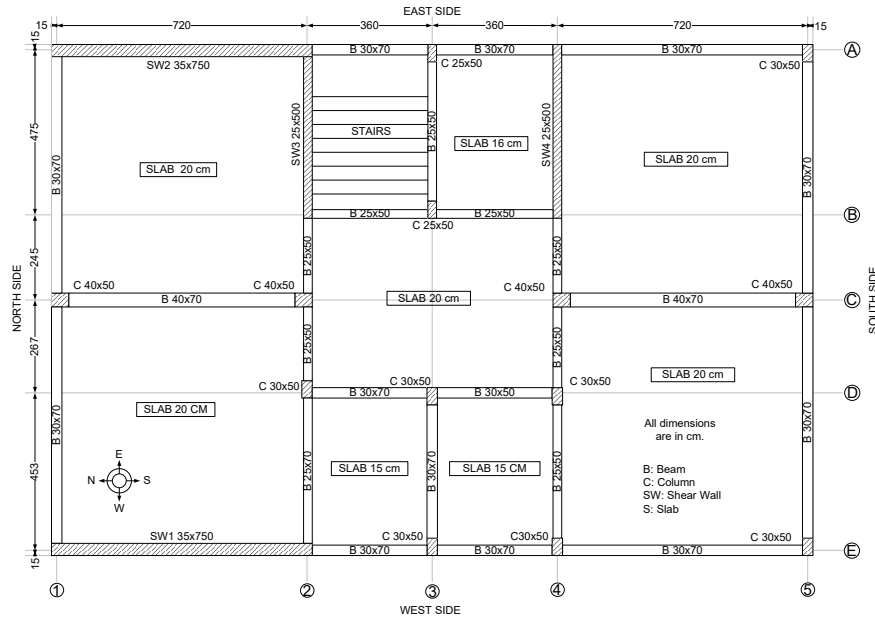


Figure 2. Typical plan view of the building.

### 3. Observed Behavior of the Building after the Earthquake

The side views of the building are shown in Figure 3 to Figure 5. The school building experienced total collapse. The locations between the 4 and 5 axes had collapsed, producing a sandwich-type failure of slabs on top of each other. The first floor had collapsed for the rest of the building, and the other floors were barely/partially standing with hefty damage. All the building has shifted towards the west direction, with fewer shear walls in the east-west direction compared to the north-south direction.



Figure 3. Southwest and west side views of the building.



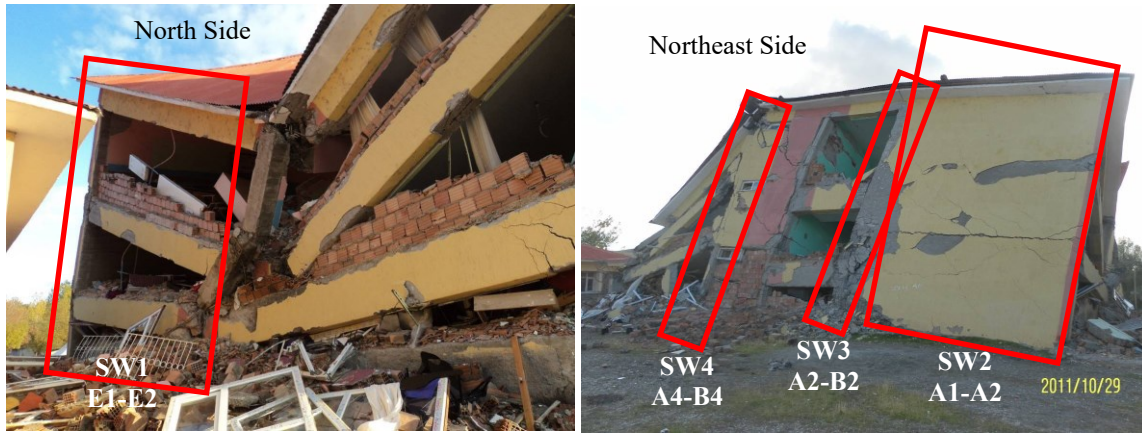


Figure 4. North and northeast side views of the building.

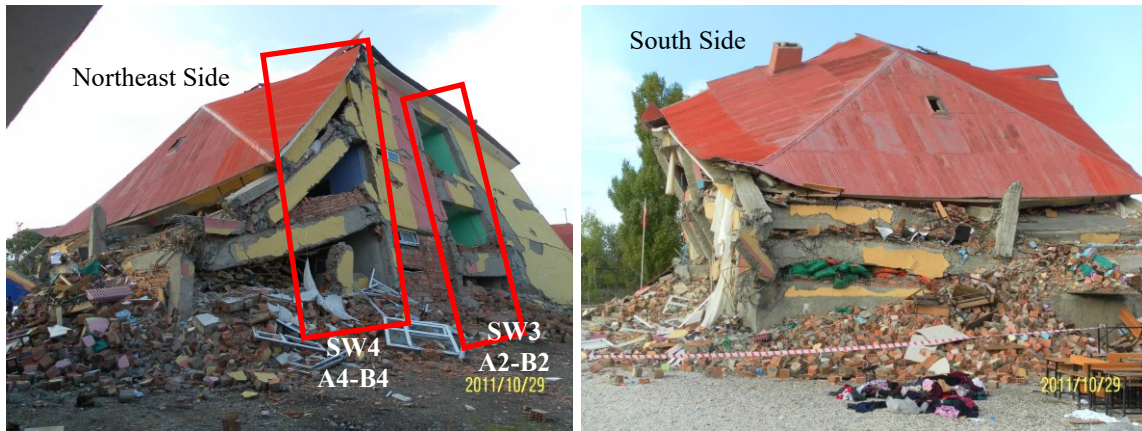


Figure 5. Southeast and south views of the building.

The base of the shear wall SW1 (SW1 E1-E2) had separated from the foundation due to the pull-out of the reinforcing bars and shifted approximately 1 m towards the west. This shear wall also experienced significant damage and bending in the weak direction towards the west, as shown in Figure 6. Shear wall SW2 (SW2 A1-A2) was significantly deformed in a weak direction. However, the base of this shear wall did not entirely separate from the foundation, as shown in Figure 4. However, a significant length of the longitudinal reinforcement was observed to pull-out, resulting in a detachment of approximately 100 mm between this shear wall SW2 and the foundation on one side. It was also observed that reinforcement bars were spliced at the base of the shear walls and columns (probable hinging locations) where the maximum load effects would occur.



Figure 6. Failure of shear wall SW1 (E1-E2 Axis).

The base of shear walls SW3 (SW3 A2-B2) and SW4 (SW4 A4-B4) were also separated from the foundation for the same reason and shifted approximately 0.5 m towards the north and west directions. Photographs of the motion of the bottom side of the shear wall SW4 are shown in Figure 7 and Figure 8.



Figure 7. Failure of shear wall SW4 (A4-B4).



Figure 8. Separation of shear wall SW4 from the foundation (A4-B4).

It was observed that the quality of the concrete used in the building was also poor. Although concrete compressive strength of 22.5 MPa was specified in the drawings and calculations, the in-situ concrete strength seemed much less. Large aggregates, improper placement, and insufficient concrete compaction were observed throughout the building.

Plain bars were used as longitudinal and transverse reinforcing steel in the construction of the building. Using deformed bars prior to Specification for Buildings to be Constructed in Earthquake Areas (MPWS, 2007) was not required as longitudinal reinforcement in column and beam elements in Türkiye. The specified yield strength of reinforcing steel was 220 MPa in the drawings and calculations. Poor detailing and craft were observed throughout the building, such as closely placed longitudinal reinforcement for beams and columns. The ends of the stirrups were not bent 135° to keep core concrete in place after the cover concrete was lost. Observations related to these problems are shown in Figure 9. Also, no adequate confinement of the stirrups (large spacing of transverse reinforcement) was observed at the ends of beams, end of columns, and beam-column joints (potential plastic hinge regions), as shown in Figure 9.



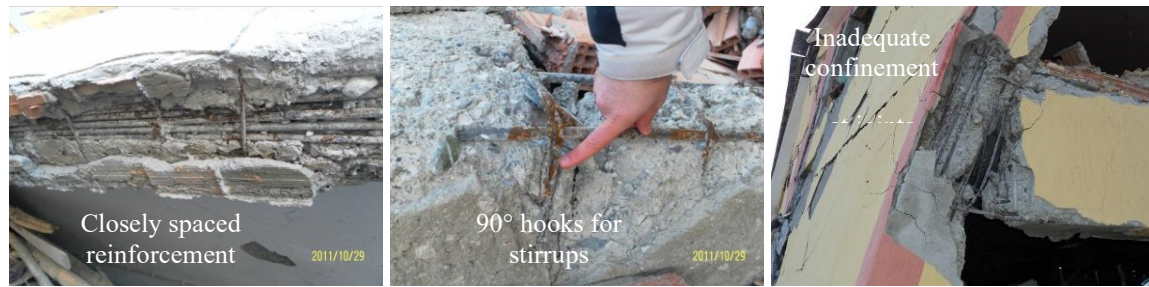


Figure 9. Problems related to reinforcement.

#### 4. 3D Modeling

SAP2000 Structural Analysis Software was used to evaluate the behavior of the building subjected to seismic loading. The beams and columns were modeled using frame elements, whereas the shear walls and slabs were modeled using shell elements. Various views of the model are shown in Figure 10.

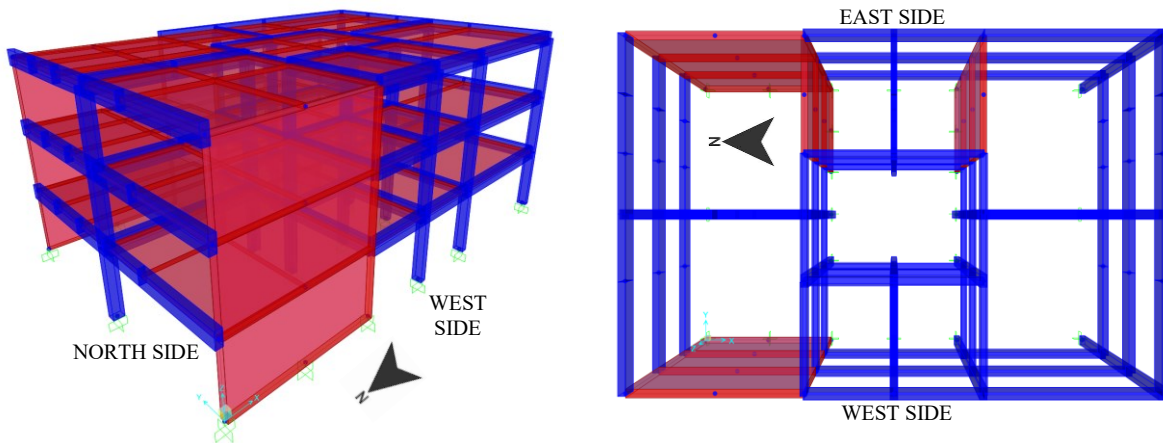


Figure 10. 3D views of the building model.

#### 4.1. Materials

Although the specified concrete strength used in the calculations and drawings was 22.5 MPa, C16 concrete class was used in the analysis as requested by İnel et al. (2006). For the steel reinforcement, S220 was used. Values related to the material properties are shown in Table 1.

Table 1. Material properties used in the analysis

Definition	Value
C16 Characteristic Compressive Strength (MPa)=	16
C16 Modulus of Elasticity (MPa)=	27000
Unit Weight of Concrete (kNm <sup>-3</sup> )=	24
S220 Tensile Strength (MPa)=	220
S220 Modulus of Elasticity (MPa)=	200000
Unit Weight of Steel (kNm <sup>-3</sup> )=	77

#### 4.2. Cross-sections and reinforcement configuration

The cross-sections defined in the model were determined based on the projects obtained from the Turkish Republic Ministry of Environment and Urbanization, Directorate General of Construction Works, and the observations at the site visit after the failure. Five different beam cross-sections, B250×500 mm, B250×700 mm, B300×500 mm, B300×700 mm, and B400×700 mm; three different

columns cross-sections, C250×500 mm, C300×500 mm, and C400×500 mm; three different slabs, S150, S160, and S200 mm; and two different shear walls, SW1-SW2 350×7500 mm and SW3-SW4 250×5000 mm were used in the model. The dimensions and locations of beams, columns, slabs, and shear walls are shown in Figure 2. The reinforcement configurations of the beams and columns are shown in Figure 11. No confinement of stirrups was provided at the ends of columns and beams. For shear walls,  $\phi 10/35$  cm reinforcement was used in both directions on both sides of the walls.

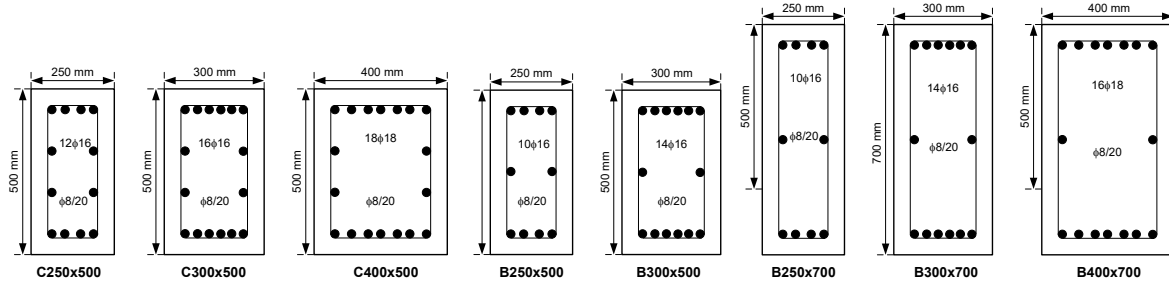


Figure 11. Reinforcement configuration for column and beams.

### 4.3. Loads

The loads applied on the building were determined based on the Turkish Standard 498 - Design Loads for Buildings (Turkish Standards Institute [TSE], 1997) and the observations at the site visit after the failure. The dead load (DL) due to the roof structure was taken as  $1 \text{ kNm}^{-2}$ . Additional DL on slabs due to plain concrete, slab cover, and ceiling plaster was estimated as  $2 \text{ kNm}^{-2}$ . The location of the building is a frigid region in Türkiye. Therefore, the plaster on the exterior walls was very thick. Based on on-site observations, this thickness was approximately equal to 50 mm. The walls consisted of hollow bricks (full brick for outer walls having 190 mm thickness and half brick for inner walls having 85 mm thickness) plaster on both sides (50+50 mm for exterior walls and 20+20 mm for interior walls). The estimated line DL due to walls on exterior beams was  $10.94 \text{ kNm}^{-1}$  [ $(0.19 \text{ m} \times 12.5 \text{ kNm}^{-3} + 0.10 \text{ m} \times 20 \text{ kNm}^{-3}) \times (3.20 \text{ m} - 0.70 \text{ m})$ ] and on interior beams was  $5.03 \text{ kNm}^{-1}$  [ $(0.085 \text{ m} \times 12.5 \text{ kNm}^{-3} + 0.04 \text{ m} \times 20 \text{ kNm}^{-3}) \times (3.20 \text{ m} - 0.50 \text{ m})$ ]. Half of the DL value of walls ( $5.47 \text{ kNm}^{-1}$ ) was used for the exterior walls having windows.

The model's live loads (LL) were estimated using TS498 (TSE, 1997). A LL value of  $3.5 \text{ kNm}^{-2}$  was used for the classrooms and general-purpose rooms,  $5 \text{ kNm}^{-2}$  was applied to the corridors, and  $2 \text{ kNm}^{-2}$  was assigned to the roof. During the earthquake, there was nobody in the school building.

Gedikbulak is located in the fourth snow region based on TS498 (TSE, 1997). The snow load for Region 4 up to 1000 m elevation is  $1.6 \text{ kNm}^{-2}$ . Since the elevation of Gedikbulak from sea level is 1742 m, the snow load is increased by 15% as required by TS498 (TSE, 1997). Therefore, the snow load is calculated as  $P_{ko} = 1.6 \times 1.15 = 1.84 \text{ kNm}^{-2}$ . Snow load can be reduced if roof's slope is more significant than  $30^\circ$ . Since the roof of the building had a slope of less than  $30^\circ$ , the snow load was not reduced.

The earthquake loads were calculated using the Building Earthquake Specifications of Türkiye (MPWS, 2018). This code is very similar to the ASCE 7 (American Society of Civil Engineers [ASCE], 2016). Based on Building Importance Factor ( $I=1.5$  for school buildings), Building Usage Class ( $BKS=1$  for school buildings), Earthquake Design Class ( $DTS=1a$  for  $BKS=1$  and  $SDS$  (site class modified spectral acceleration coefficient for a short period)  $\geq 0.75$ ), and Building Height Class ( $BYS=7$  for  $DTS=1a$  and  $7 \text{ m} \leq \text{Building Height} \leq 10.5 \text{ m}$ ), the Building Target Performance Level is specified as Life Safety under DD2 Earthquake Ground Motion Level which is the motion having a mean recurrence interval of 475 years (10% probability of exceedance in 50 years). The corresponding Response Modification Coefficient ( $R$ ) and Over-Strength Factor ( $D$ ) were determined as 5 and 2.5, respectively, for a building with moment-resisting frames having limited-ductile columns and high-ductile shear walls without openings (Building System A22). Based on the site observations, it was assumed that the soil was soft clay, which a Site Class of ZE can represent. Using the Earthquake Hazard Map of Türkiye, the coefficient for a short period ( $S_s$ ), the period at 1 s ( $S_1$ ), and PGA were

determined as 0.751, 0.183, and  $0.315 \times g$ , respectively. After applying the soil modification coefficients ( $F_s=1.299$ ,  $F_1=3.453$ ), the design spectral acceleration factor for a short period ( $S_{DS}$ ) and period at 1 s ( $S_{D1}$ ) were calculated as 0.976 and 0.632, respectively. The corresponding  $T_A$ ,  $T_B$ , and  $T_L$  were calculated as 0.130, 0.648, and 6 s, respectively. For the vertical effect of the earthquake motion, two-thirds of  $SDS \times DL$  was used as specified by the code.

Another earthquake spectrum was constructed to simulate the earthquake that occurred in Gedikbulak Village on October 23, 2011. Since no closer data related to the ground motion was recorded, the measured PGA of  $0.180 \times g$  was used to produce the spectrum. Corresponding  $S_s=0.41$  and  $S_1=0.126$  were read from the Earthquake Hazard Map of Türkiye. The same Response Modification Coefficient ( $R=5$ ) and Over-Strength Factor ( $D=2.5$ ) were used for this spectrum however, the Building Importance Factor was used as 1.0 to simulate the earthquake day behavior. Using the Soil Class  $Z_E$ ,  $F_s$  and  $F_1$  were determined as 1.952 and 3.966, respectively. Corresponding spectral acceleration coefficients and periods were calculated as  $S_{DS}=0.800$ ,  $S_{D1}=0.500$ ,  $T_A=0.125$  s,  $T_B=0.624$  s, and  $T_L=6$  s. For the vertical effect of the earthquake motion, a similar approach (two-thirds of  $S_{DS} \times DL$ ) was used as the previous spectrum.

#### 4.4. Analysis scenarios

The model was analyzed for four scenarios. The first scenario was produced to evaluate the behavior of this school building if it would resist the loads specified by the latest codes. The loads specified by TS498 (TSE, 1997) (DL, LL, and SL), the Horizontal Design Spectrum with a PGA of  $0.315 \times g$  based on Building Earthquake Specifications of Türkiye (MPWS, 2018), and reinforced concrete design code TS500 (TSE, 2000) were used in the evaluation of the building. The practical section rigidity modifiers specified by Building Earthquake Specifications of Türkiye (MPWS, 2018) were also used. The supports of the bottom story columns of this model were assigned as fixed in this model. The parameters used in this model are shown in Table 2.

In the rest of the scenarios, the behavior of the building on the day of the collapse was modelled. In Model 2, the building was fixed at the supports, like in Model 1. Rollers were assigned for the supports under the shear walls SW3 and SW4 (shear walls in short direction) in Model 3 to simulate the motion of shear walls (separation from the foundation). In the last model (Model 4), all the supports of the shear walls were modeled as rollers. The DL was similar in all models. The LL for all the stories in the second, third, and fourth models were taken  $1 \text{ kNm}^{-2}$  (to simulate loads of the unfixed furniture, materials, equipment, etc., without LL of people) since at the time of the collapse, and there was nobody in the building. In addition, no SL was applied at the roof level on the models of the day of the collapse. The Horizontal Design Spectrum with a PGA of  $0.180 \times g$  was used to calculate earthquake loads for these three models. Similar effective section rigidity modifiers were used in these models (Models 2, 3, and 4), except for the modifiers of shear walls to reflect the rigid behavior.

The equivalent seismic load method was used to calculate earthquake loads as specified by Building Earthquake Specifications of Türkiye (MPWS, 2018). The seismic weight of the building was calculated as  $DL+0.6 \times LL+0.3 \times SL$ . The combinations specified by Turkish Standard 500 - Requirements for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures (TSE, 2000) and Building Earthquake Specifications of Türkiye (MPWS, 2018) were used in the analysis. The vertical load combination of  $1.4 \times DL+1.6 \times LL$  was only used for Model 1. For Models 2, 3, and 4, only the summation of DL and LL was used as the vertical load combination. The earthquake combinations for all the models required considering 30% of orthogonal direction horizontal earthquake, 30% of the vertical earthquake, and 20% of snow loads in addition to 100% of DL, LL, and any direction earthquake load (e.g.,  $1.0 \times DL + 1.0 \times LL + 1.0 \times EQX + 0.3 \times EQY + 0.3 \times EQZ + 0.2 \times SL$ ). Furthermore, the combinations also included the  $\pm 5\%$  eccentricity of the mass center of the floor length in the perpendicular direction to the earthquake direction for both x- and y-directions. The calculated earthquake loads for each story using the building periods obtained from each SAP2000 model are shown in Table 2.

Table 2. Parameters used in analysis and results

Description	Model Based on Design Parameters		Model Based on the Day of Collapse	
	Fixed Support Conditions (Model 1)	Fixed Support Conditions (Model 2)	Supports of SW3 and SW4 Roller, Others Fixed (Model 3)	Supports of Shear Walls Roller, Columns Fixed (Model 4)
Total DL (kN)		11729		
Total LL (kN)	3013		933	
Total SL (kN)	572		0	
Seismic Weight of Each Story (DL+0.6×LL+0.3×SL) (kN)	Story 3: 3332+0.6×622+0.3×572=3877 Story 2: 4016+0.6×1195=4733 Story 1: 4016+0.6×1195=4733		Story 3: 3332+0.6×311=3518 Story 2: 4016+0.6×311=4203 Story 1: 4016+0.6×311=4203	
Total Seismic Weight (DL+0.6×LL+0.3×SL) (kN)	13343		11924	
Effective Section Rigidity Modifiers	<b>Shear Walls:</b> In Plane: Axial=0.5, Shear=0.5 Out of Plane: Bending=0.25, Shear=1.0		<b>No reduction for shear walls.</b>	
	<b>Slabs:</b> In Plane: Axial=0.25, Shear=0.25 Out of Plane: Bending=0.25, Shear=1.0 <b>Beams:</b> Bending=0.35, Shear=1.0 Bending=0.70, Shear=1.0		<b>Slabs:</b> In Plane: Axial=0.25, Shear=0.25 Out of Plane: Bending=0.25, Shear=1.0 <b>Beams:</b> Bending=0.35, Shear=1.0 Bending=0.70, Shear=1.0	
Building Factors:	Building Importance Factor ( <b>I</b> ) = <b>1.5</b> [Building Usage Class ( <b>BKS</b> ) = <b>1</b> for schools] Building Design Class ( <b>DTS</b> ) = <b>1a</b> (for BKS = 1 and $S_{DS} \geq 0.75$ ) Building Height Class ( <b>BYS</b> ) = <b>7</b> (for DTS = 1a and $7 \leq$ Building Height $\leq 10.5$ m) Target Performance: <b>Life Safety</b> under <b>DD-2</b> using <b>Strength Design</b> (for DTS = 1a and <b>BYS</b> > 3) Response Modification Coefficient ( <b>R</b> ) = <b>5</b> (Building System: A22) Over-strength Factor ( <b>D</b> ) = <b>2.5</b> (Building System: A22)		Building Importance Factor ( <b>I</b> ) = <b>1.0</b> Response Modification Coefficient ( <b>R</b> ) = <b>5</b> Over-strength Factor ( <b>D</b> ) = <b>2.5</b>	
	Site Class How is PGA obtained? Earthquake Hazard Map of Türkiye Site Coefficients: $S_s = 0.751$ , $S_1 = 0.183$ , <b>PGA = 0.315×g</b>		ZE Recorded PGA on site Site Coefficients: $S_s = 0.41$ , $S_1 = 0.126$ , <b>PGA = 0.180×g</b>	
Spectrum Coefficients for DD-2 Earthquake Level	Soil Coefficients: $F_s = 1.299$ , $F_1 = 3.453$ , Horizontal: $S_{DS} = 0.976$ , $S_{D1} = 0.632$ , $T_A = 0.130$ s, $T_B = 0.648$ s, $T_L = 6$ s Vertical: $(2/3) \times S_{DS} \times DL$		Soil Coefficients: $F_s = 1.952$ , $F_1 = 3.966$ , Horizontal: $S_{DS} = 0.800$ , $S_{D1} = 0.500$ , $T_A = 0.125$ s, $T_B = 0.625$ s, $T_L = 6$ s Vertical: $(2/3) \times S_{DS} \times DL$	
Building Periods (s)	$T_x = 0.189$ $T_y = 0.323$	$T_x = 0.168$ $T_y = 0.230$	$T_x = 0.169$ $T_y = 0.413$	$T_x = 0.591$ $T_y = 0.478$
Structural System	$R_x = 2.744$	$R_x = 3.173$	$R_x = 3.178$	$R_x = 4.865$
Behavior Factor	$R_y = 2.915$	$R_y = 3.421$	$R_y = 4.152$	$R_y = 4.416$
Spectrum Coefficients	$S(T_x) = 0.976$ $S(T_y) = 0.976$	$S(T_x) = 0.800$ $S(T_y) = 0.800$	$S(T_x) = 0.800$ $S(T_y) = 0.800$	$S(T_x) = 0.800$ $S(T_y) = 0.800$
Reduced Coefficients	$S(T_x)/R_x = 0.356$ $S(T_y)/R_y = 0.335$	$S(T_x)/R_x = 0.252$ $S(T_y)/R_y = 0.235$	$S(T_x)/R_x = 0.252$ $S(T_y)/R_y = 0.193$	$S(T_x)/R_x = 0.165$ $S(T_y)/R_y = 0.181$
Total Equivalent Seismic Load (Base Shear) (kN)	$F_x = 4745$ $F_y = 4465$ $F_{3x} = 2195$ $F_{2x} = 1700$ $F_{1x} = 850$ $F_{3y} = 2066$ $F_{2y} = 1600$ $F_{1y} = 800$ $F_{3z} = 2167$ $F_{2z} = 2612$ $F_{1z} = 2612$	$F_x = 3008$ $F_y = 2790$ $F_{3x} = 1407$ $F_{2x} = 1067$ $F_{1x} = 533$ $F_{3y} = 1305$ $F_{2y} = 990$ $F_{1y} = 495$ $F_{3z} = 1778$ $F_{2z} = 2143$ $F_{1z} = 2143$	$F_x = 3003$ $F_y = 2298$ $F_{3x} = 1405$ $F_{2x} = 1065$ $F_{1x} = 533$ $F_{3y} = 1075$ $F_{2y} = 815$ $F_{1y} = 408$ $F_{3z} = 1778$ $F_{2z} = 2143$ $F_{1z} = 2143$	$F_x = 1962$ $F_y = 2161$ $F_{3x} = 918$ $F_{2x} = 696$ $F_{1x} = 348$ $F_{3y} = 1011$ $F_{2y} = 767$ $F_{1y} = 383$ $F_{3z} = 1778$ $F_{2z} = 2143$ $F_{1z} = 2143$

## 5. Results and Discussions

### 5.1. Elastic analysis

The models were linearly analyzed using the equivalent seismic load method for four conditions. A total of 25 combinations were used in the analysis, including the  $\pm 5\%$  accidental eccentricity in both x- and y-directions. The vertical effect of the earthquake in the z-direction was also considered. The primary mode of failure for the first three models was in the y-direction. For the

last model, where all the supports of the shear walls were rollers, the primary mode of failure was torsional. After the analysis, structural members of the building were checked against bending, shear, and axial load. The first model used material factors  $\gamma_{mc}=1.5$  and  $\gamma_{ms}=1.15$  for concrete and steel strengths, respectively. No material factors were used to evaluate Models 2, 3, and 4. The results of the capacity check considering axial, shear, and flexure are shown in Figure 12. These results are tabulated in Table 3. The red members in these figures have capacity ratios of more than 1.0, meaning insufficient members.

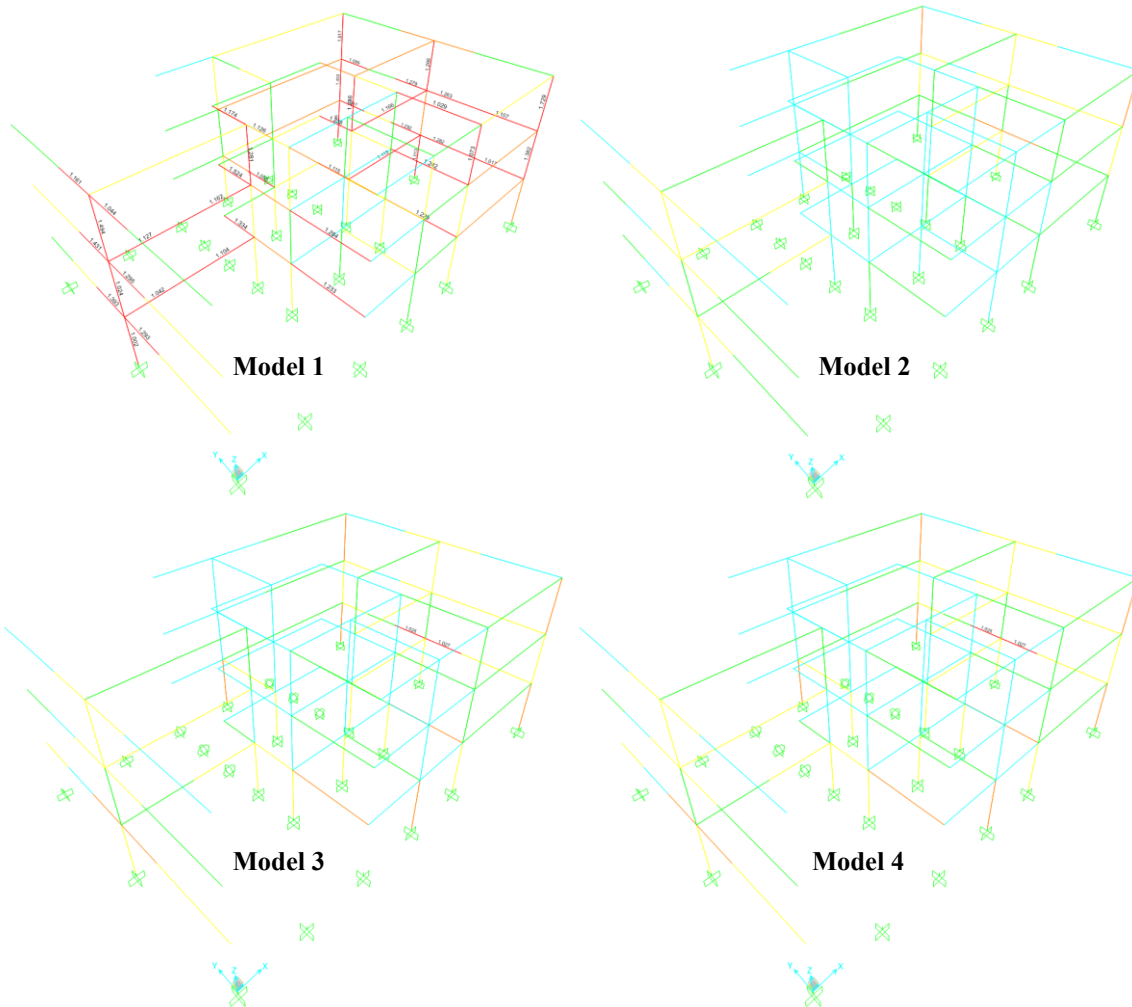


Figure 12. Results of capacity check of models (only the ratios more than 1.0 are shown).

Table 3. Tabulated analysis results of all models

Description	Model Based on PGA=0.315×g		Model Based on the Day of Collapse (PGA=0.180×g)	
	Fixed Support Conditions (Model 1)	Fixed Support Conditions (Model 2)	Supports of SW3 and SW4 Roller, Others Fixed (Model 3)	Supports of Shear Walls Roller, Columns Fixed (Model 4)
Insufficient Elements	13 columns 26 beams	0 columns 0 beams	0 columns 2 beams	17 columns 10 beams
Maximum Capacity Ratio	1.917 for columns 1.524 for beams	Less than 1 for all columns and beams	Less than 1 for columns 1.027 for beams	3.291 for columns 1.328 for beams
Maximum Displacement (mm)	-	$U_1=1.25$ $U_2=3.57$ $U_3=0.92$	$U_1=2.00$ $U_2=10.86$ $U_3=0.99$	$U_1=20.71$ $U_2=28.78$ $U_3=15.43$

The results of the elastic analysis of Model 1 indicate that the building would not resist the design loads specified by current codes since the capacity ratio of some of the members exceeded the



limit of 1.0. Note that if this building were designed using current codes, more robust materials (C25 and S420 shall be used as a minimum) and larger cross-sections would be used to avoid insufficient members in the elastic analysis.

Results obtained from the elastic analysis of Model 2 indicate that the school building should have survived the earthquake that occurred on October 23, 2011. No beams or columns exceeded the capacity ratio of 1.0. In addition, the levels of load effects resisted by the shear walls were all under acceptable limits. However, the building collapsed totally. From the behavior of Model 2, it can be concluded that the failure of this building on the day of the earthquake was not related to the capacity exceedance (moment, shear, or axial load) of the structural members.

The reason for the collapse can be explained based on the results of the analysis of Models 3 and 4. Initially (as indicated by Model 3), the supports of the shear walls oriented in a short direction (SW3 and SW4) were separated from the foundation due to inadequate development and lap splice length of the reinforcing bars. Note that the reinforcing bars used in the building were all plain bars without any ribs. The poor bonding characteristics of plain reinforcing bars with low concrete quality resulted in pulling out of these reinforcing bars out of concrete elements. Later, this separation continued (as indicated by Model 4) with shear walls oriented in a long direction (SW1 and SW2). The loss of the connections of shear walls to the foundation resulted from excessive building motion in both directions. At this point, the moment capacity of 17 columns was exceeded with a maximum capacity ratio exceedance of more than three times, resulting in a total collapse of the building.

For the existing school buildings with the same typical projects (No: 10370), the bottom parts of the shear walls shall be strengthened to prevent any pull-out of the reinforcing bars resulting in the separation of the shear walls from the foundation. Later, the insufficient members (both beams and columns) of Model 1 shall be strengthened to resist the design loads calculated based on the current code practices. Additional shear walls in the short direction may be constructed as a final touch to have similar ratios of the areas of shear walls in both directions.

## 5.2. Nonlinear pushover analysis

A nonlinear pushover analysis was performed for the four models explained above to generate the overall force-deformation response and identify key performance levels in force and deformation. In these models, hinge locations are defined at the ends of the beams and columns of the building. Auto hinge property (P-M2-M3) specified in Table 10-8 of [ASCE 41 \(2013\)](#) (readily available in SAP2000) for the columns and auto hinge property (M3) specified in Table 10-7 of [ASCE 41 \(2013\)](#) (readily available in SAP2000) for the beams were used at the ends of the columns and beams located at 5% relative distance from both ends. Also, using the frame hinge assignment overwrites, the line objects at hinges were defined to be automatically subdivided into 2% of the relative length of the line elements at hinges. The start of the nonlinear pushover analysis of the structure started was continued from the state at the end of the nonlinear DL Case. The displacement-controlled load was applied separately as an acceleration at a roof-level joint in both x- and y-directions. Resultant base shear vs. monitored displacement relationships were obtained at the end of the analysis, as shown in Figure 13. These graphs show that the structure had greater stiffness in the x-direction than in the y-direction, which was evident due to the number of shear walls in different directions. Therefore, the structure's failure mode in the direction West (y-direction in the models) can be defined as the dominant mode of failure, and evaluations related to this direction will be explained in detail afterward. The capacity of Model 4 was the lowest in both directions.



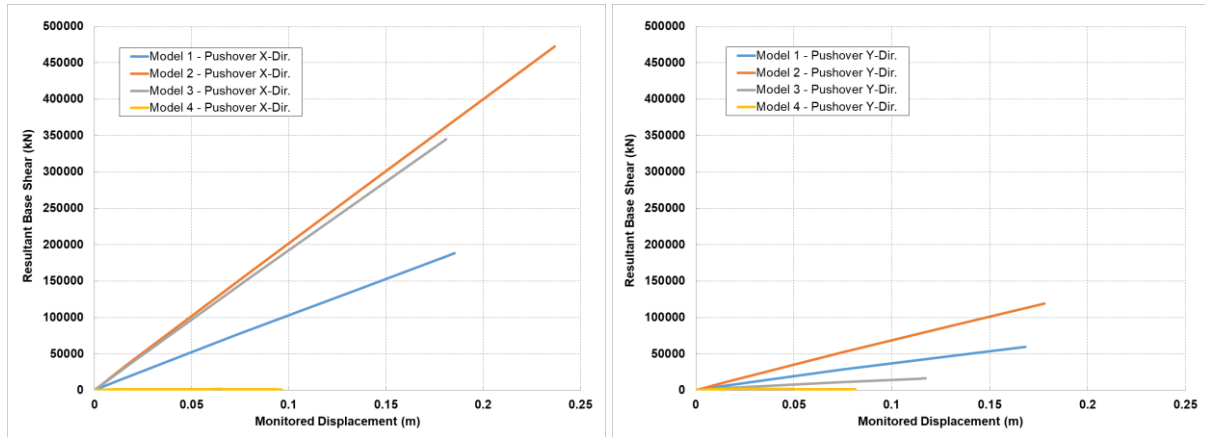


Figure 13. Resultant base shear vs. monitored displacement relationships in x- and y-directions.

The analysis results were compared to Capacity Spectrum Method (CSM) defined in ATC 40 (Applied Technology Council [ATC], 1996). The coefficients used to produce the 5% damped elastic response spectrums are shown in Table 4. The results of this comparison and the data related to the performance point of the models are shown in Table 5 and Figure 14. Based on the table, the values for the effective period, spectral acceleration, spectral displacement, base shear, and roof displacement of Model 1 at the performance point in the y-direction were equal to 0.303 s, 0.926 ms<sup>-2</sup>, 0.0022 m, 12489 kN, and 0.032 m, respectively. In spectral acceleration vs. displacement graphs (Figure 14), the capacity and demand curves are plotted in green and orange colors, respectively. These figures indicate that Models 1, 2, and 3 had capacities beyond the demands implying that they would survive the specified earthquakes. However, Model 4 had a capacity significantly below the demand curve, which indicates that the model would fail under the specified loads and conditions without reaching a performance point.

Table 4. Coefficients of the 5% damped elastic response spectrums (CSM)

Description	Model Based on PGA=0.315×g	Model Based on the Day of Collapse (PGA=0.180×g)		
	Fixed Support Conditions (Model 1)	Fixed Support Conditions (Model 2)	Supports of SW3 and SW4 Roller, Others Fixed (Model 3)	Supports of Shear Walls Roller, Columns Fixed (Model 4)
C <sub>A</sub> (=S <sub>DS</sub> /2.5)	0.3904		0.32	
C <sub>V</sub> (=S <sub>D1</sub> )	0.632		0.5	
T <sub>A</sub> (=T <sub>A</sub> ) (s)	0.130		0.125	
T <sub>S</sub> (=T <sub>B</sub> ) (s)	0.648		0.625	

Table 5. Results at performance point in the y-direction

Description	Model Based on PGA=0.315×g	Model Based on the Day of Collapse (PGA=0.180×g)		
	Fixed Support Conditions (Model 1)	Fixed Support Conditions (Model 2)	Supports of SW3 and SW4 Roller, Others Fixed (Model 3)	Supports of Shear Walls Roller, Columns Fixed (Model 4)
T <sub>eff</sub> (s)	0.303	0.211	0.484	NA
S <sub>a</sub> (ms <sup>-2</sup> )	0.926	0.8	0.598	NA
PUSH-Y S <sub>d</sub> (m)	0.022	0.0089	0.041	NA
V (kN)	12489	9659	7446	NA
D (m)	0.032	0.013	0.046	NA
Step Numbers				
Performance Point	1 & 2	1 & 2	1 & 2	NA
Lies in between				

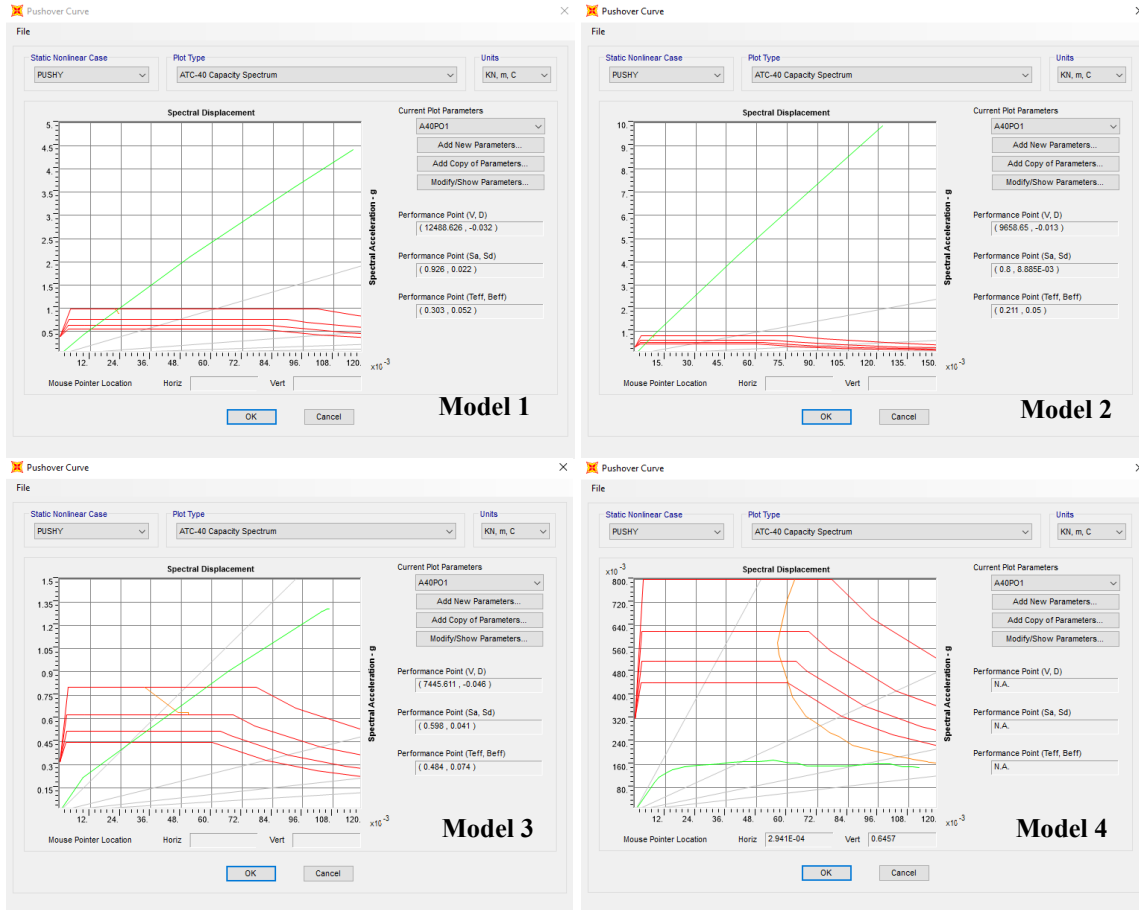


Figure 14. Capacity and ATC-40 Demand comparisons for y-direction pushover analysis.

The structure's hinge evaluation is performed using the graph shown in Figure 15 (ATC 40, 1996). In this figure point A refers to the original undeformed state of the hinge. Elastic deformation occurs between points A and B. At point B, the hinge starts yielding. Three performance levels, namely, immediate occupancy (IO), life safety (LS), and collapse prevention (CP), are defined between points B and C. After the event, the hinge shall be safe and usable at the IO performance level. For the LS performance level, the hinge may be damaged, which will not provide any threat to life safety. Although the hinge is severely damaged in the collapse prevention performance level, the collapse of the hinge is prevented. The ultimate capacity of the hinge is reached at point C. Point D represents the residual strength of the hinge. After this point collapse of the collapse is initialized, and the total failure of the hinge happens at point E.

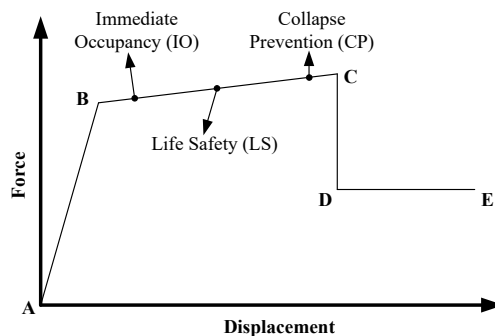


Figure 15. Force-displacement relationship of hinges.

The SAP2000 Software provided step numbers of the pushover analysis where the performance points are located, as shown in Table 5. Performance levels of hinges of all the models at

various steps of pushover analysis in y-direction are shown in Figure 16. Based on this figure, the hinges of Model 1 and 2 experienced deformations at the yielding level. This level was located before the IO level resulting in no or minimal damage to the structure at those levels of ground motions. Some hinges of Model 3 would reach the IO level, producing no failure at that level of ground motion. However, Model 4 had failed hinges at the maximum analyzable state (Step 41) using SAP2000 and still did not reach a performance point. This confirms the findings of the elastic analysis in which the failure of the structure is associated with the loss of the connections of shear walls to the foundation resulting in excessive motion of the building in both directions.

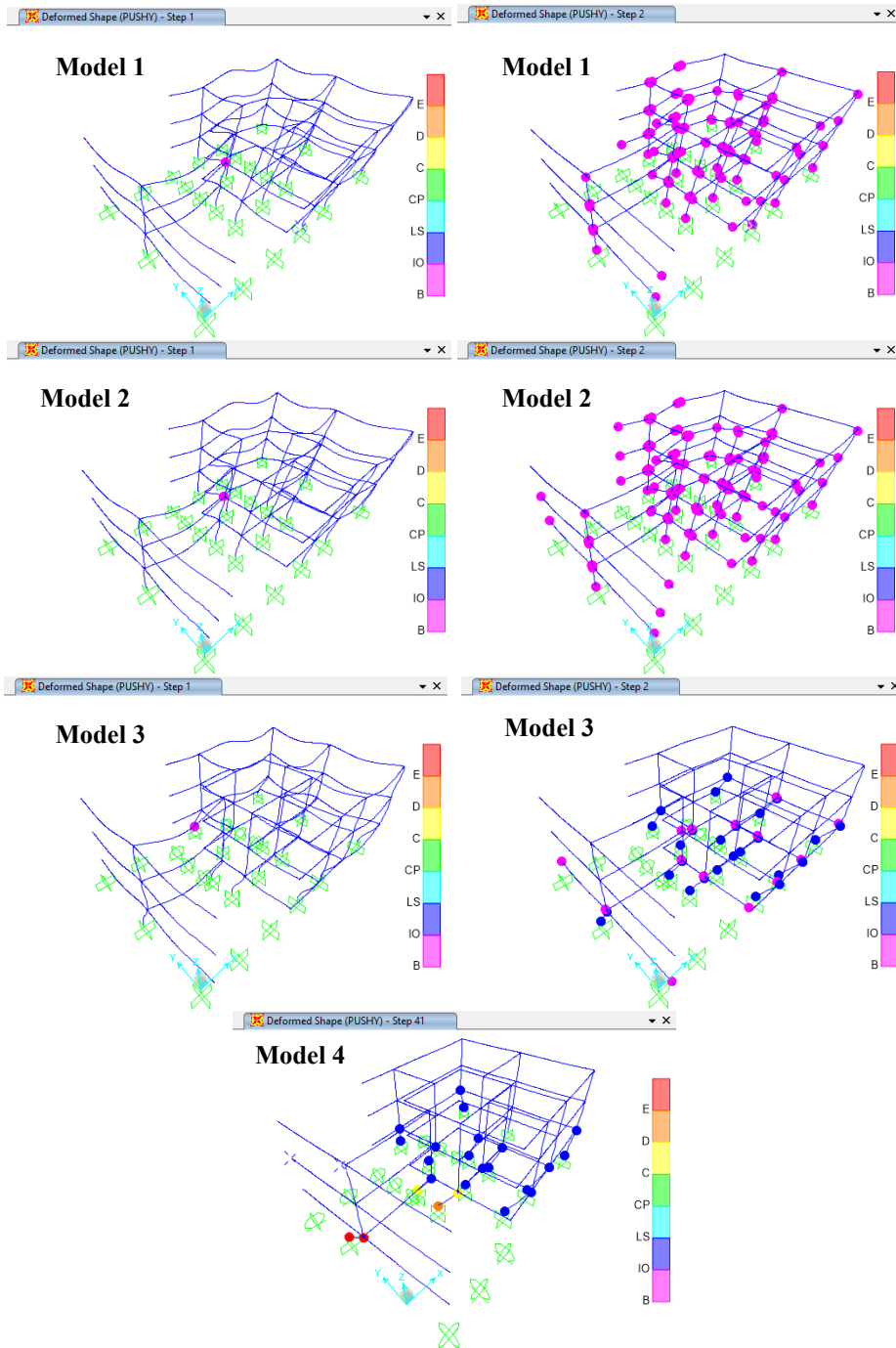


Figure 16. Performance levels of hinges at various steps of pushover analysis in y-direction.

## 6. Summary and Conclusions

The Gedikbulak K-12 School Building, which was a typical project widely being constructed in various locations throughout Türkiye, collapsed in the October 23, 2011 Van Earthquake. Site visit to the school building was performed a few days after the earthquake. Plans of this typical school building project were obtained and detailed elastic and nonlinear analyses were performed on the constructed models using SAP2000 Structural Analysis Software. Following conclusions were drawn:

- If the integrity of the shear walls and foundation were ensured (Model 2), the school building should have survived the earthquake occurred on October 23, 2011 based on both linear elastic and nonlinear pushover analyses.
- The collapse happened due to the separation of the bottom of shear walls (in both x- and y-directions) from the foundation due to inadequate development and lap splice length of the plain reinforcing bars. This was verified using both linear elastic and nonlinear pushover analyses (Model 4). The performance analysis would not capture these vulnerabilities if not done in lieu of the observations in Gedikbulak Village.
- For the existing school buildings with the same typical projects, the bottom parts of the shear walls shall be strengthened to prevent any pull out of the reinforcing bars. The insufficient members shall be strengthened to resist the design loads calculated based on the current code practices, and additional shear walls shall be added to the system to have similar ratios of the areas of shear walls in both directions.

## Acknowledgments

The precious efforts of the members of the team, Prof. Dr. Eray Baran and Mr. Ferit Yılmaz (you will be remembered in our hearts), are very much appreciated. The local contacts in Van, Şemsettin Bakır, Necdet Telsaç, Kamuran Turgut, and Ercan Altunlı are also acknowledged.

## References

- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2013). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*: ASCE Standard 41-13.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2016). *Minimum design loads for buildings and other structures*: ASCE/SEI Standard 7-16.
- Applied Technology Council (ATC). (1996). ATC 40: *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*.
- Baran, E., Mertol, H. C., & Gunes, B. (2014). Damage in reinforced concrete buildings during October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey earthquakes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(3), 466-479. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000396
- Damcı, E., Temur, R., Bekdaş, G., & Sayın, B. (2015). Damages and causes on the structures during the October 23, 2011 Van earthquake in Turkey. *Case Studies in Construction Materials*, 3, 112-131. doi:10.1016/j.cscm.2015.10.001
- İnel, M., Bilgin, H., & Özmen, H. B. (2006). Mevcut kamu yapılarının performans değerlendirmesi [Performance evaluation of existing state buildings] [In Turkish]. *IMO Turkey Engineering News*, 444-445, 64-71.
- Ministry of Public Works and Settlement (MPWS). (1975). *Specification for structures to be constructed in disaster areas* [In Turkish]. Ankara, Türkiye.
- Ministry of Public Works and Settlement (MPWS). (1998). *Specification for structures to be constructed in disaster areas* [In Turkish]. Ankara, Türkiye.
- Ministry of Public Works and Settlement (MPWS). (2007). *Specification for structures to be constructed in disaster areas* [In Turkish]. Ankara, Türkiye.
- Ministry of Public Works and Settlement (MPWS). (2018). *Building earthquake specifications of Türkiye* [In Turkish]. Ankara, Türkiye.
- Orak, M. S., & Celep, Z. (2017). Gedikbulak okul binasının sismik performansı hakkında [Seismic performance of Gedikbulak school building revisited] [In Turkish]. *IMO Teknik Dergi*, Technical Note, 28(2), 7889-7896. doi:10.18400/tekderg.304103

- Tapan, M., Cömert, M., Demir, C., Sayan, Y., Orakçal, K., & İlki, A. (2013). Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 34, 606-628. doi:10.1016/j.engfailanal.2013.02.013
- Turkish Standards Institute (TSE). (1997). TS498 *Turkish Standard - Design loads for buildings* [In Turkish]. Ankara, Türkiye
- Turkish Standards Institute (TSE). (2000). TS500 *Requirements for design and construction of reinforced concrete structures* [In Turkish]. Ankara, Türkiye.



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Rijitlik Merkezinin Analitik, Deneysel ve Gözlemsel Değerlendirilmesi

Enes AKSOY, Fuat KORKUT\*, Barış ERDİL

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 65040, Van, Türkiye  
Enes AKSOY, ORCID No: 0000-0002-2259-671X, Fuat KORKUT, ORCID No:0000-0002-8419-7204,

Barış ERDİL, ORCID No: 0000-0001-5282-3568

\*Sorumlu yazar e-posta: fuatkorkut@yyu.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 05.05.2023

Kabul: 05.06.2023

Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1292891

#### Anahtar Kelimeler

Betonarme bina,  
Burulma,  
Kütle merkezi,  
Rijitlik merkezi

**Öz:** Bu çalışma kapsamında mimar ve inşaat mühendislerine dört adet betonarme bina kat planı verilerek kütle ve rijitlik merkezinin konumunu gözlemsel olarak belirlemeleri istenmiştir. Daha sonra bu binaların tamamı mevcutta sıklıkla kullanılan dört adet yapısal analiz programı ile 3 boyutlu olarak modellenmiş ve kütle ile rijitlik merkezleri belirlenmiştir. Son olarak 3 adet bina ölçekli olarak laboratuvar ortamında test edilmiş ve rijitlik merkezi deneysel olarak belirlenmiştir. Yapılan analizler ve değerlendirmeler gözlemsel olarak kütle merkezi konumunun tahmin edilebileceği, mimarların ve inşaat mühendislerinin rijitlik merkezi tahminlerinin deneysel çalışmalar sonucu elde edilen rijitlik merkezi konumundan çok farklı olduğu, yapısal analiz programlarından ETABS, Sta4CAD ve ProtaStructure'ın birbirine benzer konumları rijitlik merkezi olarak belirlemesine karşın, İdeCAD programından elde edilen sonuçların farklı olduğu görülmüştür.

### Analytical, Experimental and Visual Evaluation of the Rigidity Center

#### Article Info

Received: 05.05.2023

Accepted: 05.06.2023

Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1292891

#### Keywords

Center of mass,  
Reinforced concrete building,  
Rigidity center,  
Torsion

**Abstract:** Within the scope of this study, four reinforced concrete building floor plans were given to architects and civil engineers and they were asked to visually determine the location of the center of mass and rigidity. Then, all of these buildings were 3D modeled using four common structural analysis programs to determine the centers of mass and rigidity. Finally, 3 buildings were tested in a laboratory environment and the center of rigidity was calculated experimentally. The analyzes and evaluations revealed that the center of mass location can be estimated visually, however, the center of rigidity of the buildings cannot be predicted by architects and civil engineers since the predicted locations were found be far from the experimental and analytical ones. Although structural analysis programs ETABS, Sta4CAD and ProtaStructure determine similar locations as centers of rigidity, it has been observed that the results obtained from the ideCAD program are different.



## 1. Giriş

Deprem yükü kütle merkezine etkir ve binayı rijitlik merkezi etrafında döndürmeye çalışır. Kütle merkezi ile rijitlik merkezinin birbirine yakın olmadığı durumda meydana gelen burulma olayında kütle ve rijitlik merkezlerinin konumları önemli rol oynamaktadır. Burulma binanın kendi eksen etrafında dönmesine sebep olduğundan düşey taşıyıcı elemanlarda ilave kesme kuvvetlerine yol açmaktadır.

Bir bina tasarlanırken mimari tasarım esnasında kolon ve perde duvarların konumlarına ve boyutlarına karar verilirken statik tasarım esnasında düşey taşıyıcı sistem elemanlarının nihai boyutları belirlenmektedir. Mimari planı etkileyebileceğinden statik tasarım esnasında kolon ve perde duvar konumlarında genellikle değişiklik yapılmamaktadır. Bu sebeple mimari tasarım esnasında burulmayı önleyebilmek için kütle ve rijitlik merkezlerinin tespiti için AutoCAD programında yer alan AutoLISP programlama dilinde programlar yazılmıştır (İdemen, 2003).

Rijitlik merkezi kolon ve perde duvarların büyüklükleri ve konumlarına bağlı olduğundan sistemde önemli düzeyde burulma etkisinin oluşmaması için tasarımı yapan mimar ve inşaat mühendislerinin kütle ve rijitlik merkezi konumları hakkında bilgi sahibi olması beklenmektedir.

Binanın depremde iyi bir performans göstermesi için x ve y asal yönlerde yeterli rijitlik ve sünekliğe sahip olması istenir. Rijitlik ve sünekliği sağlayacak kolon ve perde duvarların simetrik olarak yerleştirilmesi gerekir ve bu sayede kütle ile rijitlik merkezlerinin birbirine yakın olması sağlanmış olur. Asimetrik olarak yerleştirilen kolon ve perde duvarlardan kaynaklı olarak kütle merkezi ile rijitlik merkezi birbirinden uzaklaşır. Deprem yükünün etkilediği kütle merkezi rijitlik merkezi etrafında binayı döndürür ve düşey taşıyıcı elemanlarda ilave kesme kuvvetlerinin oluşmasına sebebiyet verir (Ko & Lee, 2006; Doudoumis & Doudoumis, 2017).

Burulmayı tetikleyen kütle ve rijitlik merkezlerinin birbirinden uzak olmasının sebepleri kolon ve perde duvarların asimetrik yerleştirilmesidir. Bu asimetrikliğe çoğu zaman perde duvar sebep olmaktadır. Perde duvarların konum ve boyutları oldukça önemlidir. Perde duvarların asimetrik yerleştirilmesi dinamik özellikleri, kesme kuvvetlerini, momentleri, ötelemeleri ve buna bağlı olarak burulma düzensizliği katsayısını etkileyebilmektedir (Sezer, 2006; Aktan & Kırac, 2010; Erdem, 2016; Yener Demirci, 2016; Kınık, 2019; Erdil & Gündüz, 2021).

Asimetrik yerleştirilen düşey taşıyıcılardan kaynaklı olarak depremde oluşan kesme kuvvetlerinin binada burulma oluşturduğu ifade edilmiş ve burulma oranı adı verilen bir indeks ile çalışılmıştır. Önerilen burulma oranı adlı indeksin güvenilir sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Stathi ve ark., 2015).

Binanın x ve y asal eksenlerine göre kolon ve perde duvarların alanlarına ve konumlarına göre, kat rijitlik matrislerinin kurulmasıyla yapılacak analizlerle, kesme kuvvetleriyle rijitlik merkezi bulunabilmektedir. Binada tek bir rijitlik merkezi hesabı veya her kat için ayrı bir rijitlik merkezi hesabı yapılabilmektedir (TBDY, 2018; ProtaStructure, 2021; Sta4CAD, 2019; İdeCAD, 2020; Cheung & Tso, 1986; Hejal & Chopra, 1987; Goel & Chopra, 1993; Basu & Jain, 2007; Georgoussis, 2010; Bosco ve ark., 2013; Doudoumis & Doudoumis, 2017). Rijitlik merkezi perde duvarların atalet momentiyle (TBDY, 2018), perde duvar ve kolonların atalet momentiyle (ProtaStructure, 2021), kat dönmelerinin sıfırlanmasıyla (Sta4CAD, 2019), döşeme hizasındaki kesme kuvvetlerinin ağırlık merkezlerinin alınmasıyla (İdeCAD, 2020) ve kat düzlemindeki bir noktaya yapılarak birim kuvvet ile momentlerin yüklemeleri sonucunda oluşan dönmelerin oranlanmasıyla (ETABS, 2021) hesaplanabilmektedir.

Rijitlik merkezinin deneysel olarak hesaplandığı çalışma sayısı çok sınırlıdır. Sarsma tablası üzerinde 17 katlı olarak 1/12 ölçeğinde imal edilmiş betonarme bir bina deprem kayıtları kullanılarak test edilmiştir. Sismik performansın belirlenebilmesi için yapılan bu testte asimetrik binada burulma etkilerinin baskın olduğu ve kat planı içerisinde perde duvarın olmadığı esnek olarak adlandırılan kısımda hasarın meydana geldiği belirtilmiştir (Ko & Lee, 2006).

Bu çalışma kapsamında 12 mimara ve 34 inşaat mühendisine 4 binanın kütle ve rijitlik merkezlerinin konumunu tahmin etmesi için bir anket hazırlanmış ve kendilerine verilen kat planları üzerinde kütle ve rijitlik merkezlerini tahmini olarak işaretlemeleri istenmiştir. Bu 4 bina aynı zamanda ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılan yapısal analiz programlarınca (Sta4CAD, İdeCAD, ProtaStructure ve ETABS) modellenerek kütle ve rijitlik merkezleri belirlenmeye çalışılmıştır. Son olarak binalar balsa ile MDF ürünleri kullanılarak ölçekli olarak laboratuvar ortamında imal edilmiş ve deneysel olarak rijitlik merkezi tespit edilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Bina özellikleri

Bu çalışma kapsamında Şekil 1’de verilen 4 farklı bina kullanılmıştır. Genel olarak perde duvarlar binaların dış akslarına yerleştirilmiştir. A3 binasında perde duvarlar x ve y yönü doğrultusunda ayrı ayrı simetrik olmasına rağmen kolon yerleşimleri simetrik değildir. Diğer binalarda kolon ve perde duvar yerleşimi simetrik olarak düzenlenmemiştir. Şekil 1’deki planlar kütle merkezinden bölünmüş ve 4 bölge oluşturulmuştur. Düşey taşıyıcı eleman bilgileri 4 bölge için x ve y yönleri dikkate alınarak ayrı ayrı Çizelge 1-4’te verilmiştir. Çizelgelerde  $A_{cx}$  x doğrultusunda uzanan kolonların toplam alanını,  $A_{cy}$  y doğrultusunda uzanan kolonların toplam alanını,  $A_{swx}$  x doğrultusunda uzanan perde duvarların toplam alanını ve  $A_{swy}$  y doğrultusunda uzanan perde duvarların toplam alanını göstermektedir. Kare kolonlar her iki yönde de dikkate alınmıştır.

Kolonlarının tamamı y yönünde uzanan A1 binasında perde duvar alanı en fazla 1. bölgede yer almıştır (Çizelge 1). Kuzey ve batı cepheleri tamamıyla perde duvarlar ile çevrili olan A2 binasında 1. ile 2. bölge ve 3. ile 4. bölgede kolon alanları simetrik konumlandırıldığı Çizelge 2’te verilmiştir. A3 binasının planı incelendiğinde x yönünde uzanan perde duvarların 1. ve 3. bölgede y yönünde uzanan perde duvarların ise 1. ve 2. bölgede yer aldığı Çizelge 3’ten görülebilir. Kolon alanları perde duvar alanlarından çok küçük olarak tasarlanmıştır. A4 binasında perde duvarlar sadece 2. bölgede yer almakta diğer bölgelerde kolonlar asimetrik yerleştirilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 1. A1 binasının düşey taşıyıcı eleman bilgileri

	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	Toplam
$A_{cx}, m^2$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$A_{cy}, m^2$	0.64	0.64	0.56	0.40	2.24
$A_{swx}, m^2$	1.60	0.00	0.00	0.00	1.60
$A_{swy}, m^2$	0.00	0.00	0.92	0.92	1.84
Toplam, $m^2$	2.24	0.64	1.48	1.32	

Çizelge 2. A2 binasının düşey taşıyıcı eleman bilgileri

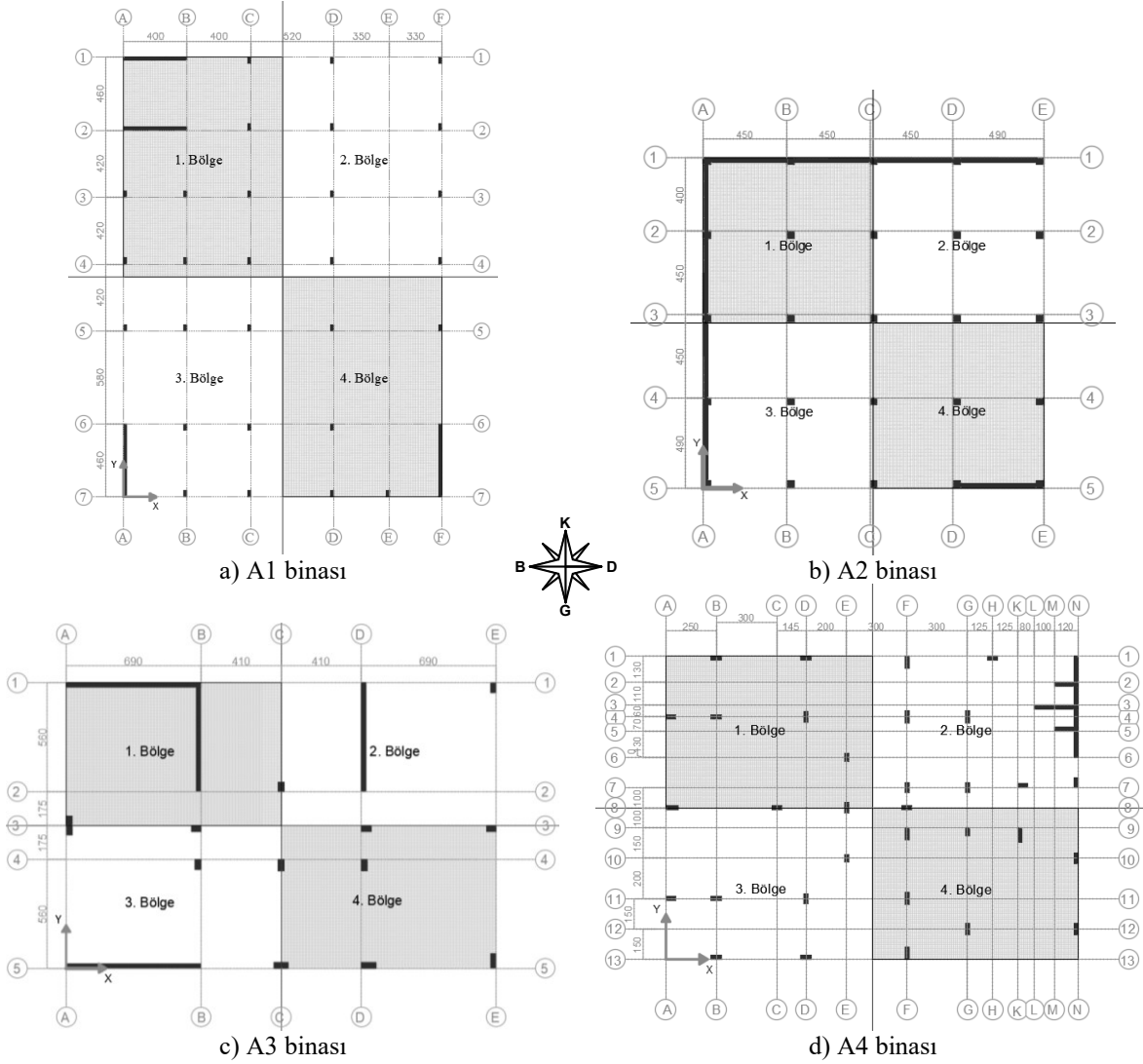
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	Toplam
$A_{cx}, m^2$	0.96	0.96	0.64	0.64	3.20
$A_{cy}, m^2$	1.20	1.20	0.80	0.80	4.00
$A_{swx}, m^2$	2.05	2.05	0.00	1.03	5.13
$A_{swy}, m^2$	1.93	0.00	2.05	0.00	3.98
Toplam, $m^2$	6.14	4.21	3.49	2.47	

Çizelge 3. A3 binasının düşey taşıyıcı eleman bilgileri

	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	Toplam
$A_{cx}, m^2$	0.51	0.25	0.51	0.05	1.32
$A_{cy}, m^2$	0.23	0.66	0.23	0.92	2.04
$A_{swx}, m^2$	0.00	0.80	0.00	0.00	0.80
$A_{swy}, m^2$	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
Toplam, $m^2$	0.740	2.71	0.74	0.97	

Çizelge 4. A4 binasının düşey taşıyıcı eleman bilgileri

	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	Toplam
$A_{cx}, m^2$	0.00	0.00	0.26	0.64	0.90
$A_{cy}, m^2$	0.23	0.23	0.39	0.50	1.35
$A_{swx}, m^2$	1.73	0.00	1.73	0.00	3.46
$A_{swy}, m^2$	1.40	1.40	0.00	0.00	2.80
Toplam, $m^2$	3.36	1.63	2.38	1.14	



Şekil 1. A1 ve A2 binalarına ait kat planları.

## 2.2. Anket uygulaması

Anket çalışmasında mimar ve inşaat mühendislerine Şekil 1'deki kat planları anlatılmış ve daha sonra bu kat planları üzerinde tahmini olarak kütle ve rijitlik merkezlerinin konumlarını işaretlemeleri istenmiştir. Anket çalışmasına 12 mimar ve 34 inşaat mühendisi katılmıştır (Etik Kurul Onay Tarihi ve Sayısı: 10.04.2023, 2023/04-03).

## 2.3. Yapısal analiz çözümleri

Yapısal analiz çalışmasında döşeme ve perde duvarlar alan eleman, kolon ve kirişler ise çubuk eleman olarak modellenmiştir. Düşey taşıyıcı sistem tüm katlarda aynen devam ettirilmiştir. Rijit diyafram kabulleri ile yapısal analizler tamamlanmıştır (Aksoy ve ark., 2022).

Yapısal analiz programlarının kullandığı hesap yöntemleri aşağıda verilmiştir:

- Kütle merkezi kat düzleminde yer alan taşıyıcı sistem elemanlarının ağırlık merkezlerinin alınmasıyla elde edilir. Denklem 1'de formülasyona yer verilmiştir.

$$x_m = \frac{\sum A_i \cdot x_i}{\sum A_i}, y_m = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

- Rijitlik merkezi deprem yükünün etkidiği kütle merkezinin etrafında döndüğü noktadır. Sta4CAD, İdeCAD, ProtaStructure ve ETABS programları rijitlik merkezi için farklı yaklaşımlar uygulamaktadır.
  - Sta4CAD programı Frame3d (Rijit Diyafram Kabulü Yapılabilen Lineer Analiz) çözümü ile rijitlik merkezi hesaplamaktadır. Analiz esnasında rijitlik matrisleri kurulurken kat dönmeleri sıfır olacak şekilde hesap yapılarak rijitlik merkezi bulunmaktadır.
  - İdeCAD rijit diyafram ve yarı rijit diyafram kabulü yapılabilen binalarda rijitlik merkezi hesabı yapmaktadır. Analiz esnasında sıfır eksantriklikte kolon ve perde duvarların döşeme hizasında oluşan kesme kuvvetlerinin ağırlık merkezini alarak rijitlik merkezini hesaplar. Denklem 2’de formülasyona yer verilmiştir.

$$x_r = \frac{\sum V_{yi} * x_i}{\sum V_{yi}}, y_r = \frac{\sum V_{xi} * y_i}{\sum V_{xi}} \quad (2)$$

- ProtaStructure programı rijitlik merkezi hesabını kolon ve perde duvarların atalet momentlerini alarak yapmaktadır.

$$x_r = \frac{\sum I_{xi} * x_i}{\sum I_{xi}}, y_r = \frac{\sum I_{yi} * y_i}{\sum I_{yi}} \quad (3)$$

- ETABS programı rijit diyafram kabulü yapılabilen yapılarda kat düzlemi içerisindeki herhangi bir noktaya x ve y doğrultularında bir birimlik yatay yük, z doğrultusunda ise bir birimlik moment yüklemektedir. Bu yüklemeler sonucunda elde edilen dönmeleri oranlayarak rijitlik merkezini hesaplamaktadır. Denklem 4’te formülasyona yer verilmiştir

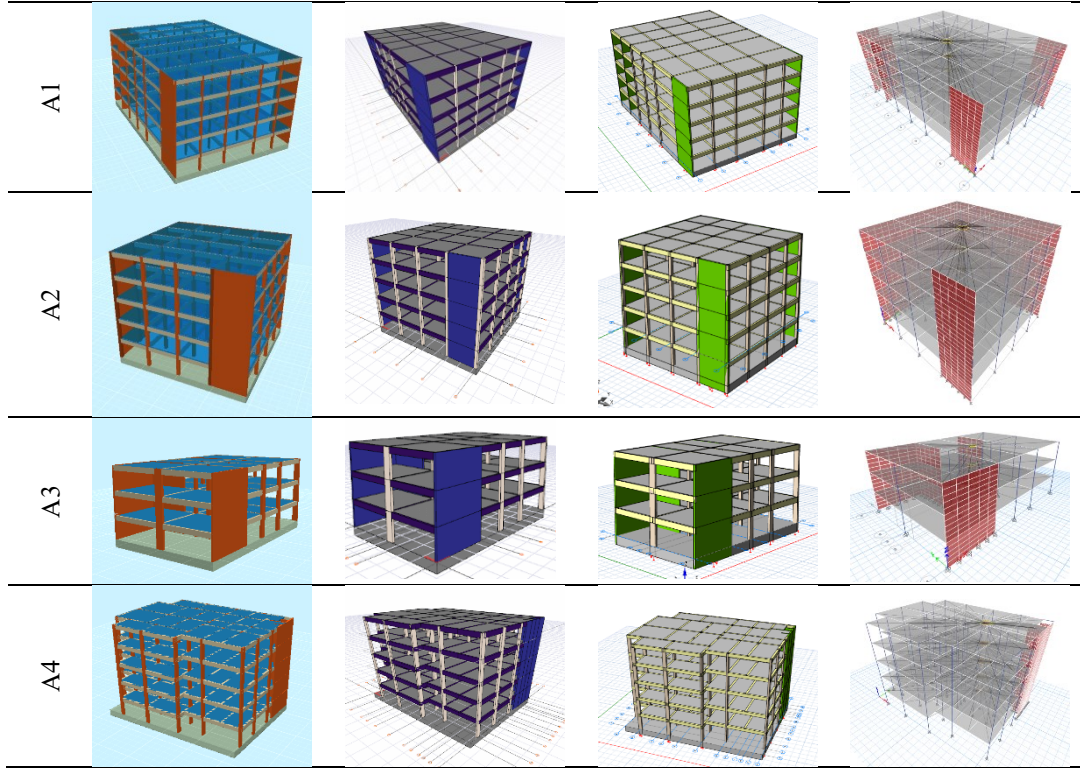
$$x_r = \frac{-R_{zy}}{R_{zz}}, y_r = \frac{R_{zx}}{R_{zz}} \quad (4)$$

Ankette kullanılan ve yapısal analizi yapılan 4 betonarme binaya ait kat planları, binaların yapısal analiz programlarındaki 3B görüntüleri ve binalara ait genel özellikler aşağıda verilmiştir. A1, A2 ve A4 binaları konut tipi olarak tasarlanırken A3 binasının mevcut durumda okul olarak kullanılması sebebi ile bina okul yapısı olarak modellenmiştir.

Binaların yapısal analizlerindeki 3B model görselleri Şekil 2’de verilmiştir. Binalarda kat yüksekliği 3 m alınmıştır. Binaların yapısal analizlerinde deprem yükü için Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesinin konum verileri kullanılmıştır. Zati yük olarak tüm katlarda 0.212 t/m<sup>2</sup> (TS498), hareketli yük ise yapı tipine göre verilmiştir. Diğer özellikler Çizelge 5’te özetlenmiştir.

Çizelge 5. Matematiksel modellerde dikkate alınan diğer bina özellikleri

Kat Sayısı	:	A1-A2-A4 5 katlı, A3 binası 3 katlı
Kiriş Ölçüleri	:	25*60 cm
Döşeme Kalınlıkları	:	20 cm
Beton	:	C25
Donatı Çeliği	:	S420
Temel Tipi	:	Radye Temel
Temel Kalınlığı	:	1 m
Zemin Türü	:	ZC
Zemin Yatak Katsayısı	:	1000 t/m <sup>3</sup>
Zemin Taşıma Gücü Tasarım Dayanımı	:	10 t/m <sup>2</sup>

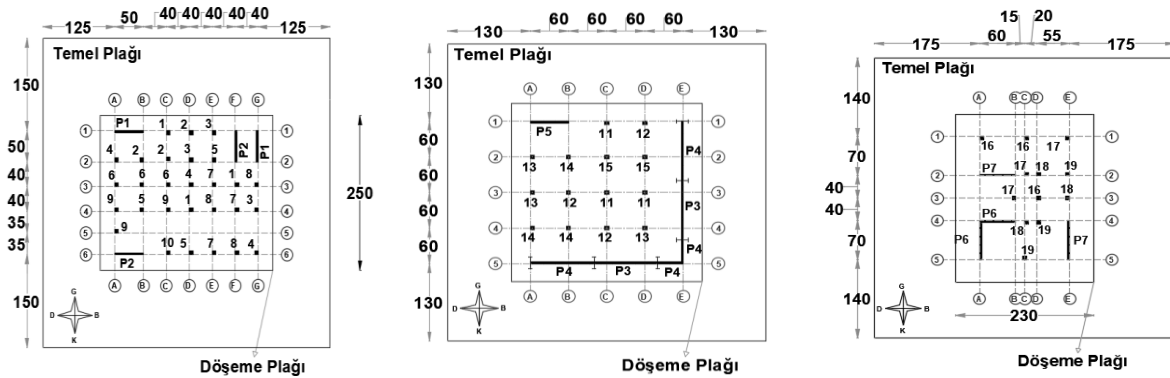


Şekil 2. Binaların 3B matematiksel modelleri.

## 2.4. Deneysel çalışma

Deneysel çalışmada rijitlik merkezi ile kütle merkezinin birbirinden uzaklaşmasından kaynaklı oluşacak burulmanın yani kat düzleminin dönmesinin gözlemlenmesi ve ölçülebilmesi için özel olarak hazırlanan bir düzenek kurulmuştur. Deney düzeneğinde laboratuvar kısıtlarından kaynaklı olarak plan ve kat yüksekliklerinde farklı ölçekler kullanılan binalar yan çevrilerek bir deney masasına yerleştirilmiş ve kendi ağırlıkları altında oluşan deplasmanlar LVDT cihazları ile kaydedilmiştir. Laboratuvar kısıtlarından dolayı A4 binasının ölçekli hali yapılamamıştır (Aksoy, 2023).

Ölçekli binalar yapılırken kolonlar 6x6x1000 mm, perde duvarlar 3x100x1000 mm kesit ölçülerine sahip balsa malzemeden, döşemeler 300x300x8 mm, temel ise 500x500x18 mm ölçülerine sahip MDF malzemeden imal edilmiştir. Plan ölçülerine göre döşeme ve perde duvarların kesit ölçülerinde değişiklik yapılmıştır (A1 250x300 mm, A2 300x300 mm ve A3 230x300 mm ölçülerinde). Düşey taşıyıcı elemanların yerleşimi için lazer yardımıyla döşemelerde 8 mm, temelde ise 4 mm kesit ölçülerine uygun delikler açılmıştır. A1, A2 ve A3 binalarında kullanılan elemanların numaraları ile ölçüleri Şekil 3'te, 3B görüntüleri ise Şekil 4'te verilmiştir.



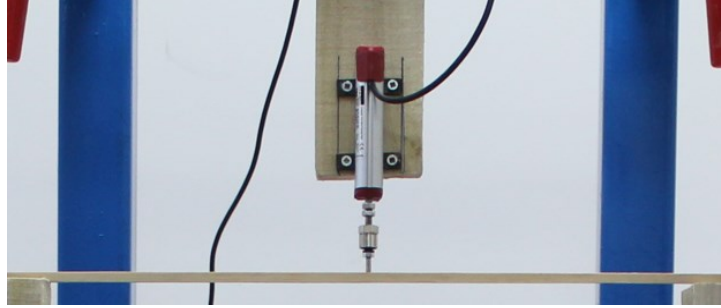
Şekil 3. A1, A2 ve A3 binalarının kat planları.





Şekil 4. Ölçekli binaların 3B modelleri.

Deney çalışması için kolon ve perde duvarların ağırlıkları hassas tartı ile ölçülmüş ve elastisite modülleri için 3 noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır (Newaz ve ark., 2016; Wu ve ark., 2020). Eğilme deneylerinde deplasmanlar LVDT cihazları ile ölçülmüş (Şekil 5) ve Denklem 5’te verilen formülle elastisite modülleri belirlenmiştir. Kolon ve perde duvarlara ait özellikler ise Çizelge 6-7’de verilmiştir. MDF malzemeden imal edilmiş döşeme plaklarının elastisite modülleri 4 856.4 MPa alınmıştır (As ve ark., 2009; Mirbolouk & Roohnia, 2015).



Şekil 5. Eğilme deneyi için örnek görsel.

$$E = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (5)$$

Çizelge 6. Ölçekli binaların kolon özellikleri

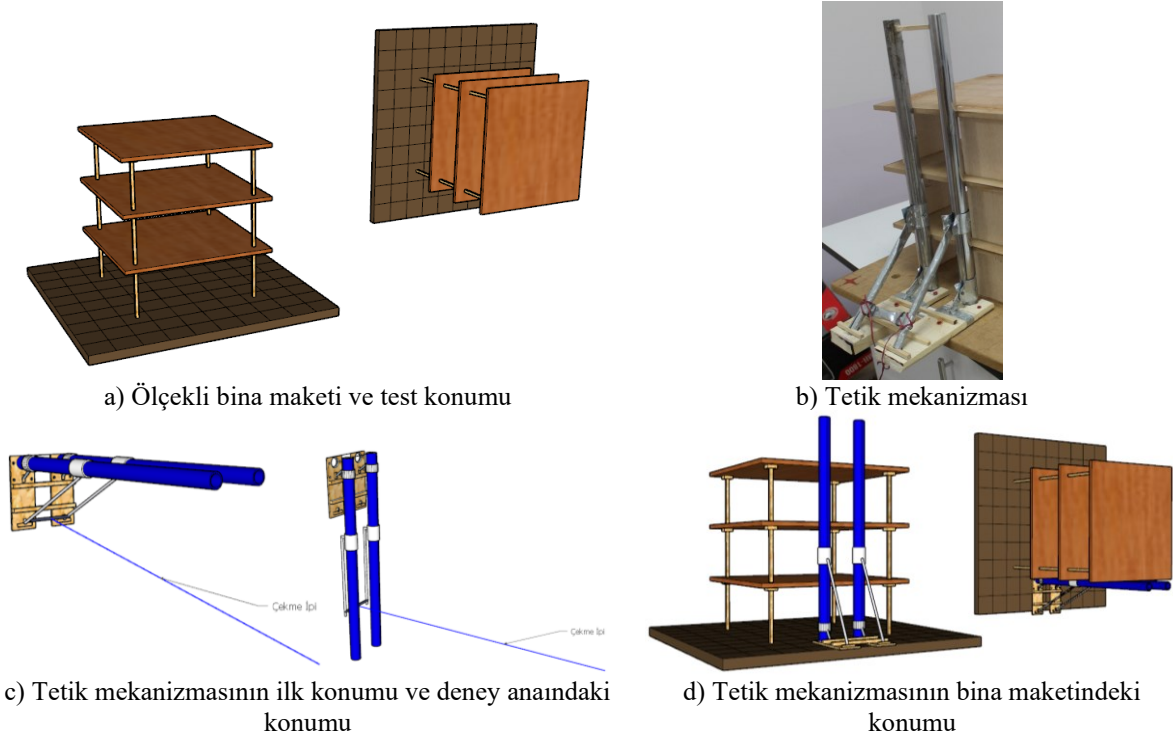
	Eleman	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (MPa)	Adet
A1	1	149.17	1 178.54	3
	2	148.06	1 169.07	3
	3	146.11	1 152.49	3
	4	146.67	1 157.22	3
	5	147.78	1 166.69	3
	6	147.78	1 166.69	3
	7	148.06	1 169.07	3
	8	147.22	1 161.96	3
	9	146.94	1 159.59	3
	10	150.00	1 185.64	1
A2	11	201.39	1 623.78	3
	12	205.28	1 656.94	3
	13	204.44	1 649.83	3
	14	204.72	1 652.19	3
	15	205.00	1 654.57	3
A3	16	150.00	1 185.64	3
	17	150.83	1 192.75	3
	18	151.11	1 195.12	3
	19	151.67	1 199.85	3



Çizelge 7. Ölçekli binalara ait perde duvar özellikleri

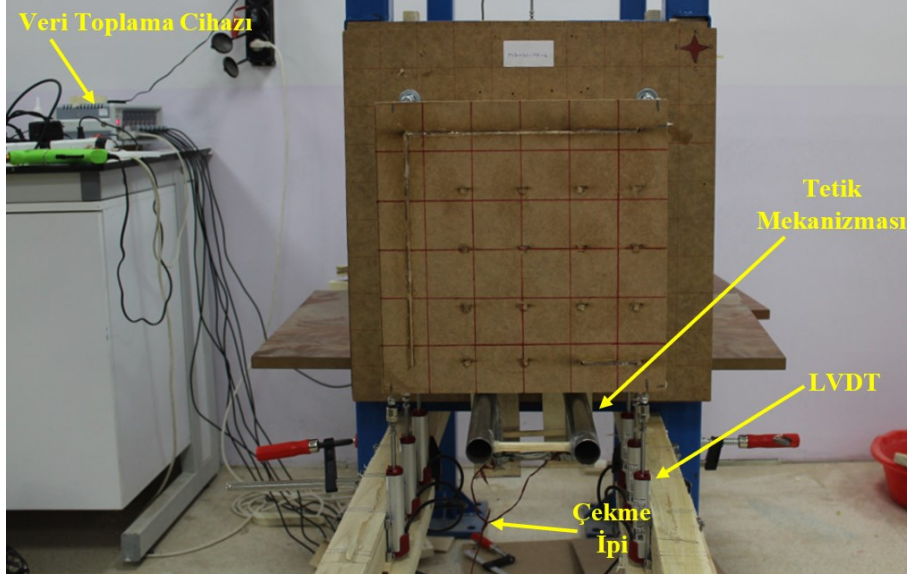
	Eleman	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (MPa)	Kesit (mm)	Adet
A1	P1	286.73	8 188.51	3x50	2
	P2	289.20	8 227.87	3x50	2
	P3	201.50	6 828.26	3x100	2
A2	P4	194.50	6 716.54	3x100	2
	P4	194.50	6 716.54	3x40	2
	P5	196.90	6 754.85	3x60	1
A3	P6	297.63	8 362.46	3x60	1
	P6	297.63	8 362.46	3x70	1
	P7	301.50	8 424.17	3x60	1
	P7	301.50	8 424.17	3x70	1

Örnek bir ölçekli binanın deneye tabi tutuluşunu göstermek için çizilen görseller Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6.a'da yer alan bina çevrilişi esnasında deplasman oluşmaması için Şekil 6.b'de verilen görselde yer alan tetik mekanizması imal edilmiştir. Tetik mekanizması deneyden önce 90° duracak ve deney anında ise 0° dönecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 6.c). Şekil 6.d'deki gibi binaya sabitlenmiş ve böylece bina deney masasına yerleştirilmiştir.



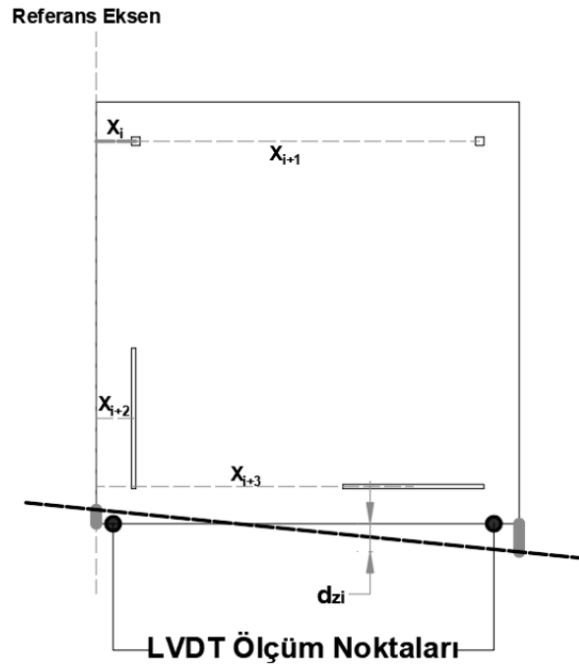
Şekil 6. Örnek bir binanın deney planları.

Deney masasına yerleştirilen ölçekli binaya silikon yardımıyla LVDT cihazları bağlanıp tetik mekanizması çekme ipi yardımıyla devre dışı bırakılmıştır. Tetik mekanizmasının devre dışı kalmasıyla ölçekli bina döşemelerinin yaptığı deplasmanlar LVDT cihazlarıyla ölçülüp veri toplama cihazına aktararak kayıt altına alınmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Deney düzeneği.

Ölçekli binanın her katının köşe noktalarında elde edilen iki deplasman değeri kullanılarak kolon ve perde duvarların deplasmanları hesaplanmıştır. Kolon ile perde duvarların merkezlerindeki deplasmanlar Denklem 6 ile belirlenmiştir (Şekil 8). Döşeme plakları rijit diyafram etkisi gösterdiği kabul edildiği için lineer denklem kullanılmıştır. Elde edilen deplasmanlardan kolon ve perde duvarların rijitlikleri (Denklem 7) kullanılarak elemanların merkezlerindeki kesme kuvvetlerine dönüştürülmüştür (Denklem 8). Bulunan kesme kuvvetlerinin ağırlık merkezlerinin alınmasıyla ölçekli binaların rijitlik merkezi konumu hesaplanmıştır. Bu denklemlerde  $d_{zi}$  binanın ilgili katının ilgili noktasındaki deplasman büyüklüğünü,  $x_i$  ilgili noktanın referans eksene olan uzaklığını,  $a$  ve  $b$  hesap sonucu bulunan katsayıları,  $F_i$  kesme kuvvetini,  $k_i$  ilgili elemanın eğilme rijitliğini,  $E_i$  ilgili elemanın elastisite modülünü,  $I_i$  ilgili elemanın atalet momentini,  $L_i$  ise ilgili elemanın net yüksekliğini ifade etmektedir.



Şekil 8. Örnek plan görünümü üzerinden deplasmanların elde edilişi.

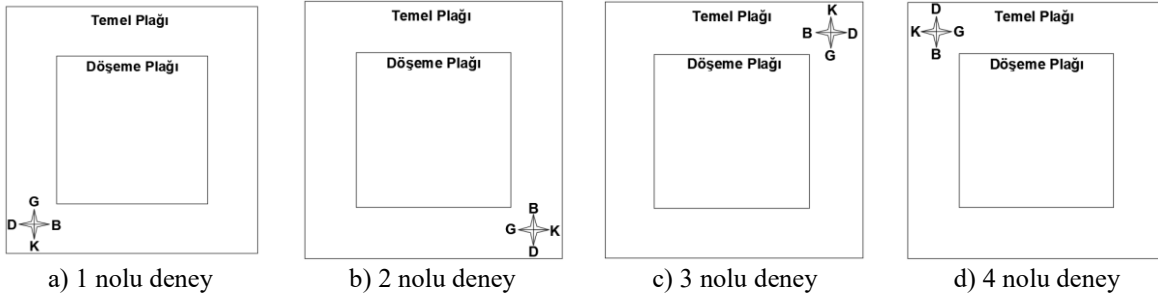
$$d_{zi} = ax_i + b \quad (6)$$

$$k_i = \frac{12 * E_i * I_i}{L_i^3} \quad (7)$$

$$F_i = k_i d_{zi} \quad (8)$$

$$R_m = \left( \frac{\sum(k_i * d_{zi}) * x_i}{\sum(k_i * d_{zi})} \right) \quad (9)$$

Binalar farklı yönlerde test edilerek rijitlik konumunun yön ile ilişkisi incelenmiştir. İlk yön için rijitlik merkezi elde edildikten sonra ölçekli bina deney masasından sökülüp 90° veya katlarıyla çevrilerek (Tetik mekanizmasının düzgün oturacağı düzleme göre) tekrardan deney masasına yerleştirilmiş ve ikinci yön için de deney yapıp rijitlik merkezi belirlenmiştir. Binanın temel plağında yer alan pusulanın konumuna göre deneyler adlandırılmıştır.



Şekil 9. Deney yönleri.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Mimar ve inşaat mühendislerinin kat planları üzerinde tahmini olarak işaretledikleri kütle ve rijitlik merkezleri, yapısal analiz sonucunda bulunan kütle ve rijitlik merkezleri ile deney sonucunda bulunan rijitlik merkezleri konumları aşağıda verilmiştir.

Anketlerde işaretlenen noktaların koordinatları AutoCAD programı yardımıyla belirlenmiş ve bu noktaların ağırlık merkezi ile standart sapmaları hesaplanmıştır. Anketlerde belirtilen kütle merkezleri için mavi renkte dairesel form kullanılırken rijitlik merkezlerinde kırmızı renkte dairesel form kullanılmıştır. Kat planları üzerinde gösterilen siyah dairesel noktalar anket sonuçlarının ağırlık merkezlerini, gri bölgeler ise x ve y doğrultusu için elde edilen standart sapma değerlerine göre bulunan alanı temsil etmektedir.

Kat planları üzerinde yer alan S Sta4CAD programının, İ İdeCAD programının, P ProtaStructure programının, E ETABS programının yapısal analiz sonucu bulunduğu noktaları gösterirken, M mimarların, İM inşaat mühendislerinin tahmini olarak işaretledikleri noktaları simgelemekte ve RM ise deney sonucu bulunan noktayı belirtmektedir.

#### 3.1. Kütle merkezleri

A1 binası için işaretleme yapan mimar ve inşaat mühendisleri kütle merkezinin genel olarak kat planının ortasına yakın ve taşıyıcı eleman miktarının fazla olduğu 1. bölgede olduğunu belirtmiş olmalarına karşın kat planı ortasından çok uzakta bir noktayı da kütle merkezi olarak seçtikleri görülmüştür (Şekil 10.a ve b). Kütle merkezini kat planı merkezinden uzaklaştıranlar perde duvar yerleşimini dikkate almışlardır. Şekil 10.a ve b incelendiğinde standart sapmanın inşaat mühendislerinin tahmininde daha düşük olduğu görülebilir. Bir başka deyişler inşaat mühendisleri mimarlara nazaran kütle merkezini birbirlerine yakın tahmin etmişlerdir.

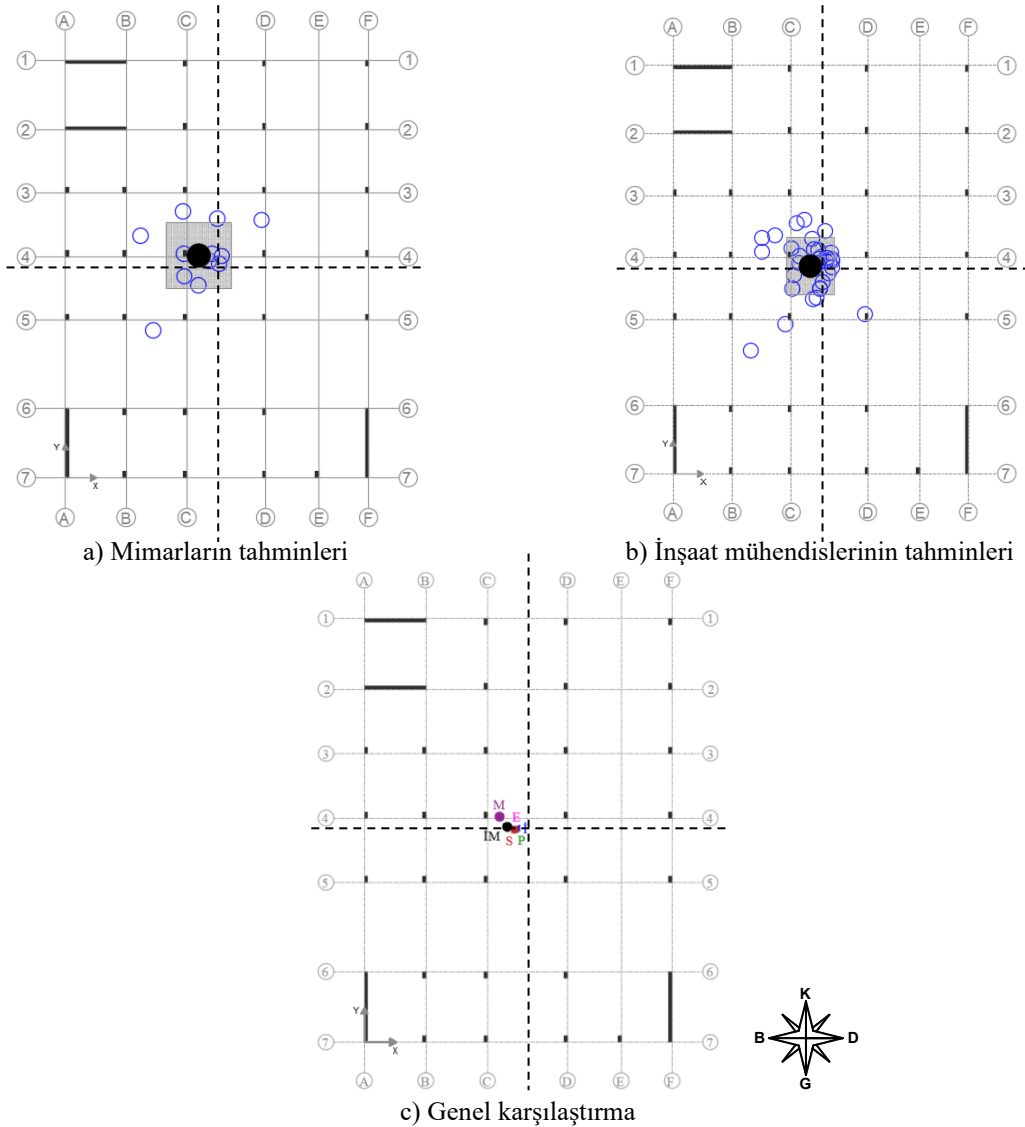
Anket tahminlerinin ortalaması yapısal analiz programlarından elde edilen kütle merkezi konumları Şekil 10.c'de karşılaştırmalı olarak verilmiş, sayısal sonuçlar Çizelge 8'de özetlenmiştir.

Çizelgede X kütle merkezinin referans A eksenine olan uzaklığını, Y ise referans 7 eksenine olan uzaklığını, “Bölge” ifadesi kütle merkezinin daha önce planda gösterilen bölge numarasını, DX ve DY ise kütle merkezi konumlarının ETABS referans noktasına olan göreceli uzaklıklarının yüzdesini göstermektedir (Denklem 10). Denklemlerde  $X_{m,ref}$  ve  $Y_{m,ref}$  x ve y yönü için referans değerleri,  $X_{m,i}$  ve  $Y_{m,i}$  farkın hesaplanacağı x ve y yönü değerlerini,  $L_X$  ve  $L_Y$  ise sırası ile binanın x ve y yönündeki plan uzunluğunu ifade etmektedir.

Şekil 10.c’den görüleceği üzere yapısal analiz programlarının tamamı kütle merkezini kat planı ortasında hesaplamakta ve en büyük fark %0.3 civarında olmaktadır. İnşaat mühendislerinin tahminlerinin ortalamasının yapısal analiz programlarına daha yakın olduğu, ETABS ile belirlenen kütle merkezi konumu referans alındığında farkın x yönü için %1.3, y yönü için ise %0.3 olduğu belirlenmiştir. Mimarların ise nispeten daha fazla fark ile (x yönü için %2.5, y yönü için %1.5) kütle merkezi konumunu tahmin ettikleri görülmüştür.

Genel bir değerlendirme yapıldığında mimar ve inşaat mühendislerinin herhangi bir hesap yapmadan tamamen gözlemsel olarak A1 binasının kütle merkezini kabul edilebilir hata oranları içerisinde tahmin ettikleri gözlenmiştir.

$$\Delta X = \left| \frac{X_{m,i} - X_{m,ref}}{L_X/2} \right| 100, \Delta Y = \left| \frac{Y_{m,i} - Y_{m,ref}}{L_Y/2} \right| 100 \quad (10)$$



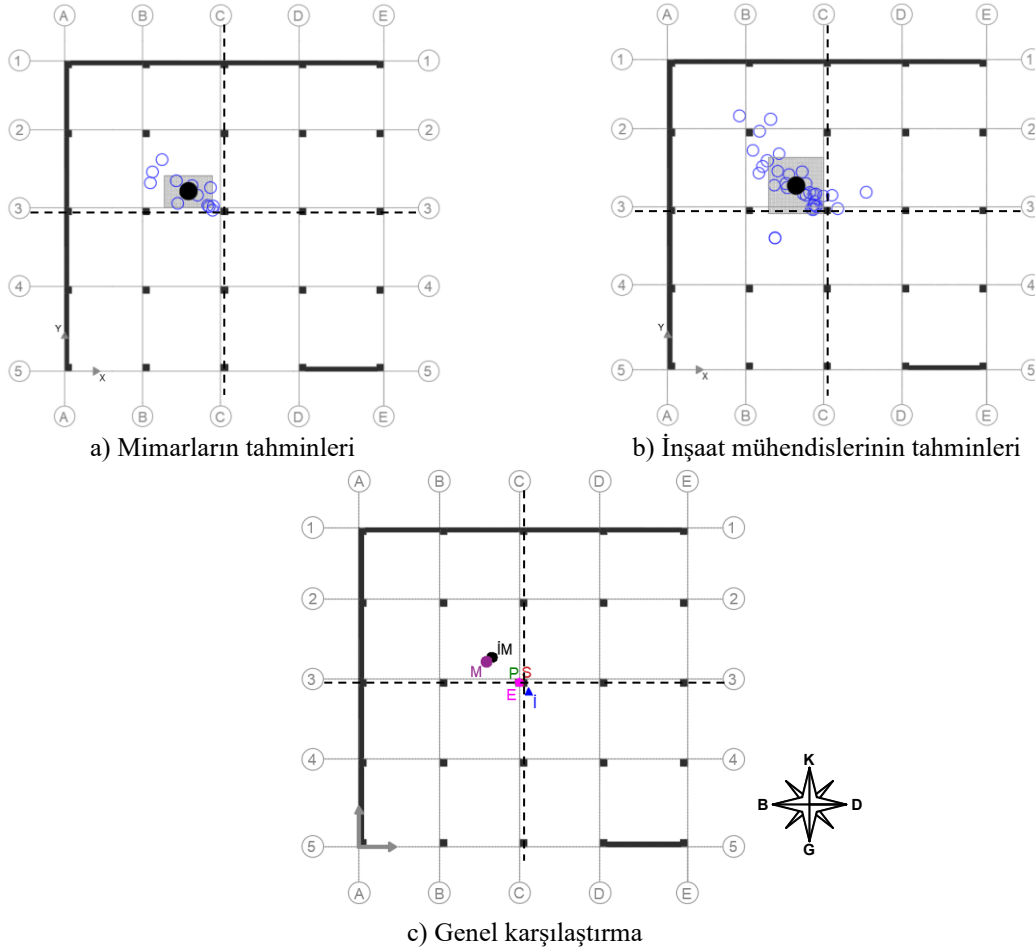
Şekil 10. A1 binası için kütle merkezinin tahminleri.

Çizelge 8. A1 binasının kütle merkezi konumları

	$X_m, m$	$Y_m, m$	DX, %	DY, %
ETABS (E)	9.79	13.86	0.0	0.0
Sta4CAD (S)	9.76	13.83	0.1	0.1
İdeCAD (İ)	9.89	13.96	0.3	0.2
ProtaStructure (P)	9.80	13.85	0.0	0.0
Mimar (M)	8.79	14.69	2.5	1.5
İnşaat Mühendisi (İM)	9.29	14.03	1.3	0.3

A2 binasının batı ve kuzey cephelerinde bina uzunluğu boyunca perde duvarlar bulunması sebebi ile mimarlar ve inşaat mühendisleri kütle merkezini kat planı ortasından bir miktar uzaklaştırarak bu perde duvarlara yaklaştırmaya çalışmıştır (Şekil 11.a ve b). Fakat tahminlerin ortalaması alındığında ortalamaların kat planı ortasına yakın ve 1. bölgede olduğu belirlenmiştir. İnşaat mühendisleri çoğunlukla benzer noktaları kütle merkezi olarak tahmin etmelerine karşın, genel düşünceden çok farklı tahminlerin de olduğu gözlenmiş, bu durumun mimarların tahminleri ile kıyaslandığında daha büyük standart sapmalara yol açtığı görülmüştür.

Şekil 11.c'de ve Çizelge 9'da yapısal analiz programlarının sonuçları anket sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. A1 binasında olduğu gibi A2 binasında da bütün yapısal programları kütle merkezini kat planının ortasına yakın hesaplamıştır. Sadece İ programı x ve y yönü için %1.4 fark ile kütle merkezinin 4. bölgede olduğunu belirtmiştir. Mimarlar ve inşaat mühendislerinin tahminlerinin ortalamasının birbirine yakın olduğu fakat yapısal analiz programlardan bir miktar uzak oldukları görülmüştür. Mimarlar, E programının sonuçları referans alındığında x yönünde %5.0, y yönünde %3.3, inşaat mühendisleri ise x yönünde %4.2 ve y yönünde %4.0 fark ile kütle merkezini 1. bölgede tahmin etmişlerdir.

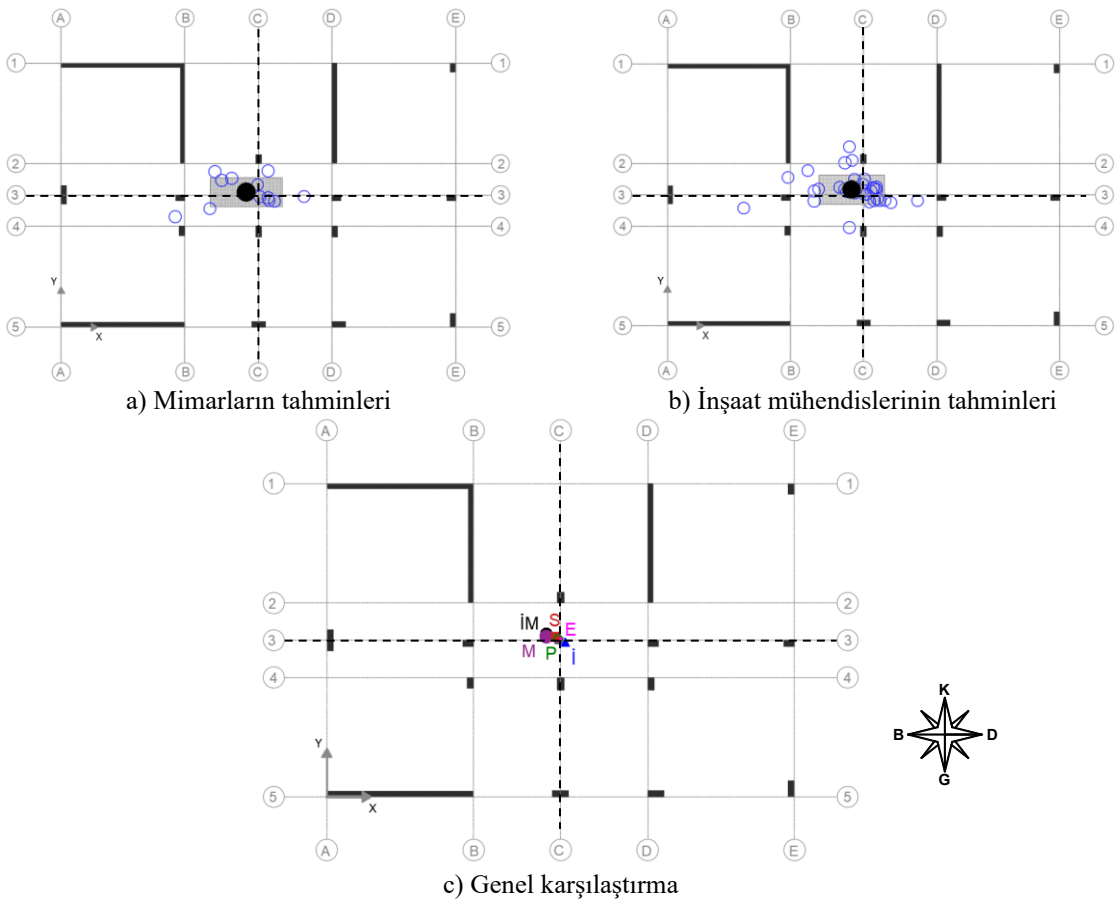


Şekil 11. A2 binası için kütle merkezinin tahminleri.

Çizelge 9. A2 binasının kütle merkezi konumları

	$X_m, m$	$Y_m, m$	$\Delta X, \%$	$\Delta Y, \%$
ETABS (E)	8.97	9.20	0.0	0.0
Sta4CAD (S)	8.99	9.22	0.1	0.1
İdeCAD (İ)	9.50	8.69	1.4	1.4
ProtaStructure (P)	8.93	9.22	0.1	0.1
Mimar (M)	7.14	10.37	5.0	3.3
İnşaat Mühendisi (İM)	7.44	10.62	4.2	4.0

A3 binasının anket sonuçları incelendiğinde Şekil 12.a ve b'den görüleceği üzere mimar ve inşaat mühendisleri genel olarak kütle merkezinin kat planı ortasına yakın olduğunu belirtmişlerdir. Mimar ve inşaat mühendislerinin ortalama tahminlerinin yapısal analiz programlarının sonuçları ile kıyaslandığında farkın çok düşük olduğu (x yönü için maksimum %1.3 ve y yönü için maksimum %0.9) belirlenmiştir (Şekil 12.c ve Çizelge 10).



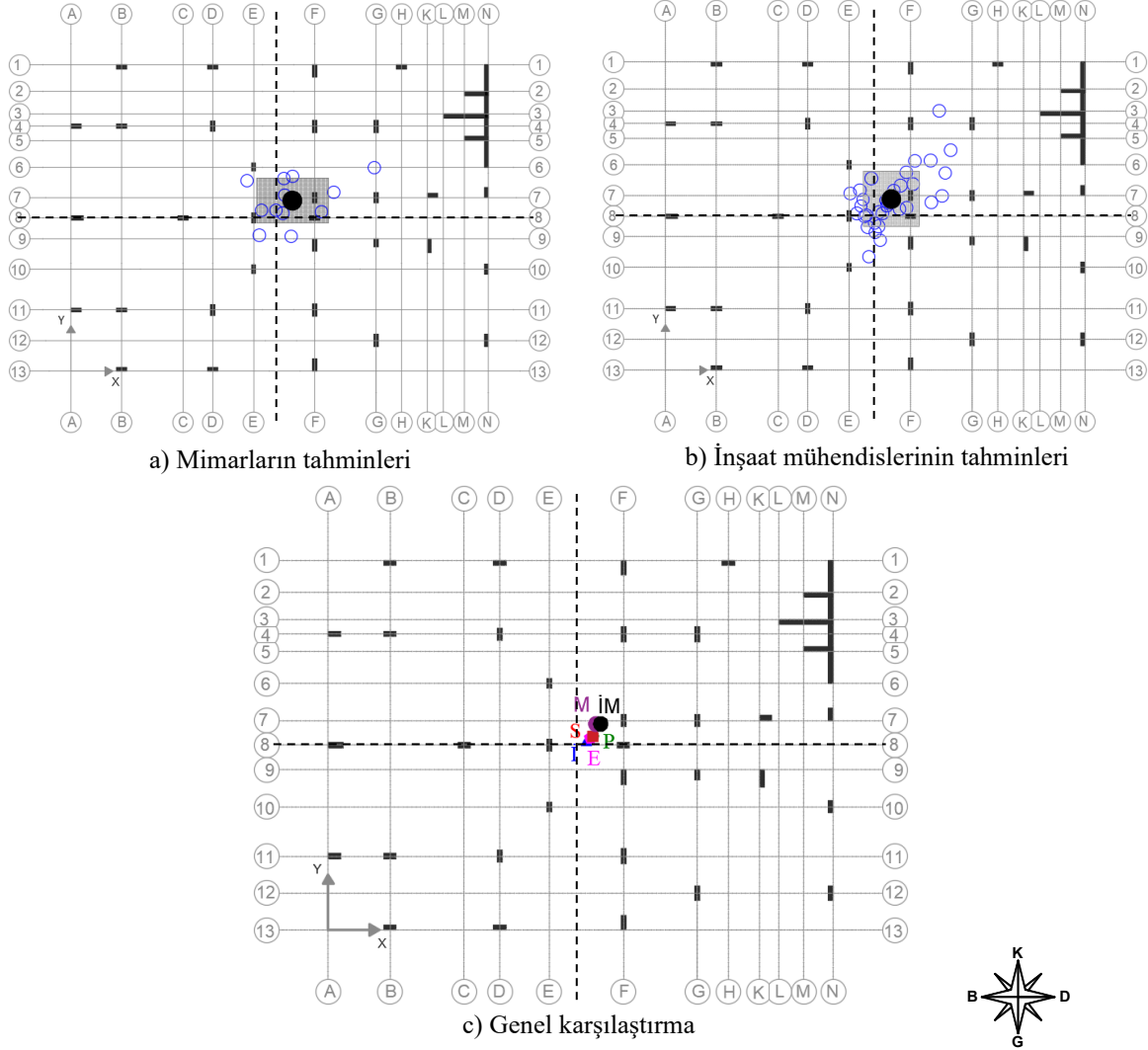
Şekil 12. A3 binası için kütle merkezinin tahminleri.

Çizelge 10. A3 binasının kütle merkezi konumları

	$X_m, m$	$Y_m, m$	$\Delta X, \%$	$\Delta Y, \%$
ETABS (E)	10.89	7.39	0.0	0.0
Sta4CAD (S)	10.76	7.53	0.3	0.5
İdeCAD (İ)	11.21	7.27	0.7	0.4
ProtaStructure (P)	10.87	7.41	0.0	0.1
Mimar (M)	10.33	7.52	1.3	0.4
İnşaat Mühendisi (İM)	10.33	7.64	1.3	0.9



A4 binasının kuzeydoğu köşesinde (2. bölgede) bulunan perde duvar grubundan dolayı mimar ve inşaat mühendislerinin kütle merkezi olarak işaretlediği nokta (Şekil 13.a ve b) bina kat planı ortasının ve yapısal analiz programlarının hesapladıkları konumun kuzeydoğusunda kalmıştır (Şekil 13.c). ETABS programı ile hesaplanan kütle merkezi konumları ile kıyaslandığında mimar ve inşaat mühendislerin genel olarak uyumlu tahminler yaptıkları belirlenmiştir.



Şekil 13. A4 binası için kütle merkezinin tahminleri.

Çizelge 11. A4 binasının kütle merkezi konumları

	$X_m, m$	$Y_m, m$	$\Delta X, \%$	$\Delta Y, \%$
ETABS (E)	10.61	7.78	0.0	0.0
Sta4CAD (S)	10.72	7.86	0.3	0.3
İdeCAD (İ)	10.46	7.69	0.4	0.3
ProtaStructure (P)	10.74	7.87	0.3	0.3
Mimar (M)	10.85	8.36	0.6	1.9
İnşaat Mühendisi (İM)	11.03	8.33	1.0	1.8

Sonuç olarak tipik bir betonarme bina kütlelerinin büyük bir kısmını döşemeler oluşturduğundan kütle merkezi genel olarak kat planı merkezine yakın olmakta ve perde duvarların yoğun olduğu bölgelere doğru kaymaktadır. Fakat perde duvarların kütle üzerindeki etkinliği planda döşemeler kadar olmadığından kütle merkezi çok fazla değişmemektedir. Bu sebeplerden dolayı mimar ve inşaat mühendisleri gözlemsel değerlendirmelerinde perde duvar yoğunluğunu dikkate alarak kat planı merkezine yakın noktaları kütle merkezi olarak tahmin etmekte ve hata oranlarının

kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla gözlemsel olarak kütle merkezi konumunun tahmin edilebileceği belirlenmiştir.

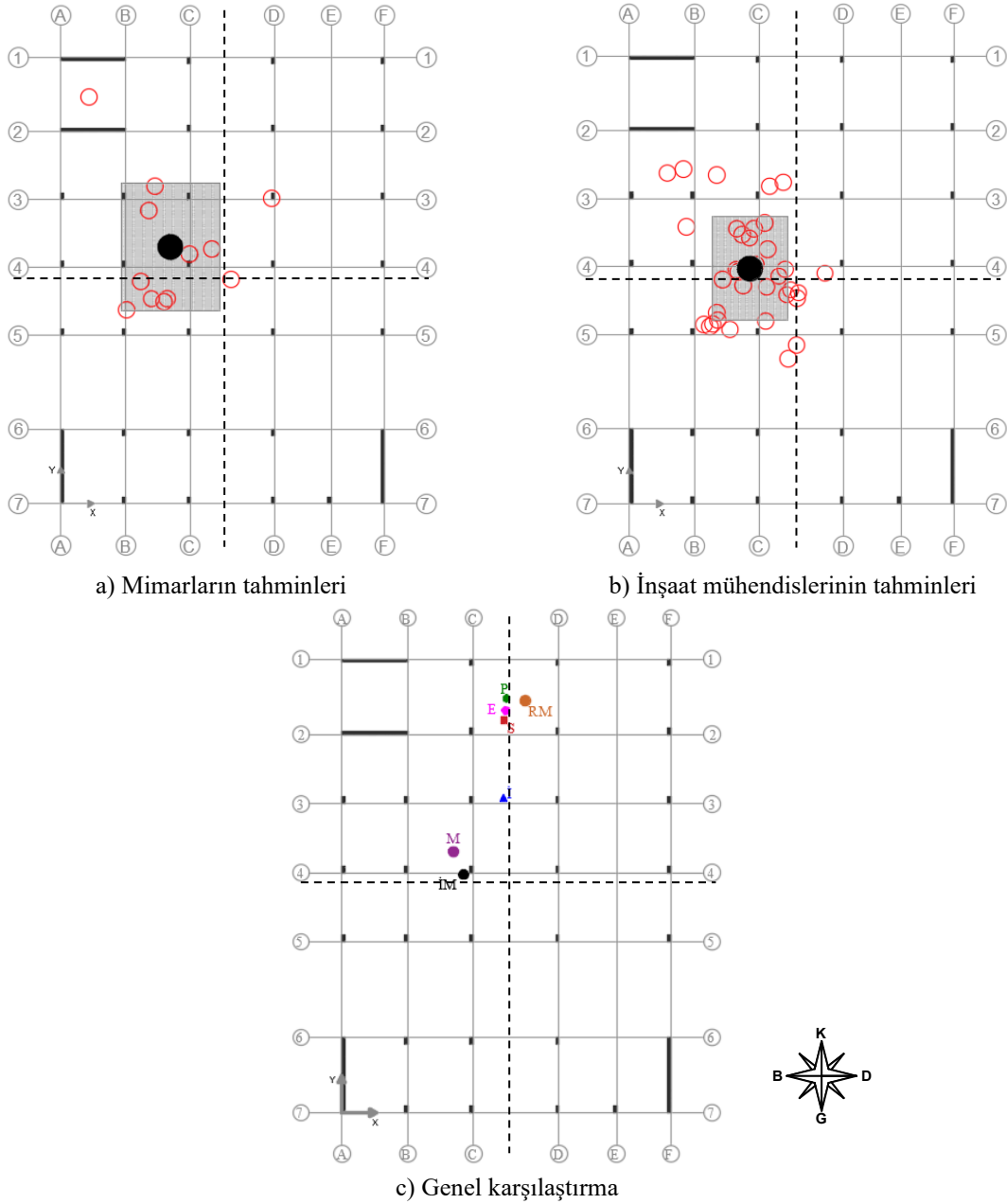
### 3.2. Rijitlik merkezleri

A1 binasının 1. bölgesinde x yönünde uzanan iki adet perde, 3. bölgesinde ve 4. bölgesinde ise y yönünde uzanan iki adet perde bulunmaktadır. Batı cephesinde (1 ve 3. bölge) yoğunlaşan 3 perde duvardan kaynaklı olarak mimarlar ve inşaat mühendisleri rijitlik merkezinin bina merkezinin batısında olduğunu belirtmişler (Şekil 14.a ve b). Bir mimarın rijitlik merkezini 1. bölgedeki perde duvarların ortasında, başka bir mimarın ise 4. bölgede işaretlemesi sebebi ile mimarların tahminlerinin standart sapma miktarı artmıştır. Fakat genel olarak mimarlar kat planı merkezinin solunda tahminler yapmışlardır. İnşaat mühendisleri birbirlerine yakın tahminler yaptıklarından standart sapma miktarı düşmüştür. Bazı inşaat mühendisleri y yönünde uzanan perdelerle yakın tahminler yapmalarına karşın bazıları rijitlik merkezini x yönünde uzanan perdelerle yaklaştırmıştır. Tahminler çoğunlukla farklı olmasına karşın gözlemsel değerlendirmedeki genel eğilime göre rijitlik merkezi kat planı merkezinin solundadır.

Mimar ve inşaat mühendislerinin tahminlerinin doğruluğunu belirlemek amacı ile söz konusu A1 binası ETABS (E), ProtaStructure (P), İdeCAD (İ) ve Sta4CAD (S) ile modellenmiş ve bu programlar tarafından rijitlik merkezi hesaplanmıştır. Ayrıca hem programların rijitlik merkezi hesabını hem de anket tahminlerini sınamak amacı ile A1 binasının ölçekli maketi hazırlanmış ve kendi ağırlığında test edilerek rijitlik merkezi deneysel olarak belirlenmiştir. Şekil 14.c ve Çizelge 12 beraber incelendiğinde P, E ve S programlarının benzer tahminler yaparak rijitlik merkezini x yönünde uzanan perdeler ile y yönünde uzanan perdelerin ortasından geçen çizginin kesiştiği noktada hesapladıkları, bu hesabın deneysel olarak bulunan rijitlik merkezine (RM) yakın olduğu belirlenmiştir. RM ile olan fark x yönü için %3.2 civarında, y yönü için ise maksimum %2.1'dir. İ programı diğer programlardan çok farklı bir noktada rijitlik merkezi hesabı yapmış ve x yönünde %3.5 fark ortaya çıkarken y yönündeki fark %10.8 olarak hesaplanmıştır. Mimar ve inşaat mühendislerinin tahminleri RM ile kıyaslandığında hem x hem de y yönünde büyük farkların olduğu, gözlemsel değerlendirme neticesinde A1 binasının rijitlik merkezi konumunun tahmin edilemediği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 12. A1 binasının rijitlik merkezi konumları

	$X_m, m$	$Y_m, m$	$\Delta X, \%$	$\Delta Y, \%$
Deney Sonucu (RM)	11.14	25.05	0.0	0.0
ETABS (E)	9.96	24.46	3.0	1.1
Sta4CAD (S)	9.85	23.88	3.2	2.1
İdeCAD (İ)	9.74	19.09	3.5	10.8
ProtaStructure (P)	9.99	25.19	2.9	0.3
Mimar (M)	6.78	15.88	10.9	16.6
İnşaat Mühendisi (İM)	7.40	14.50	9.4	19.1

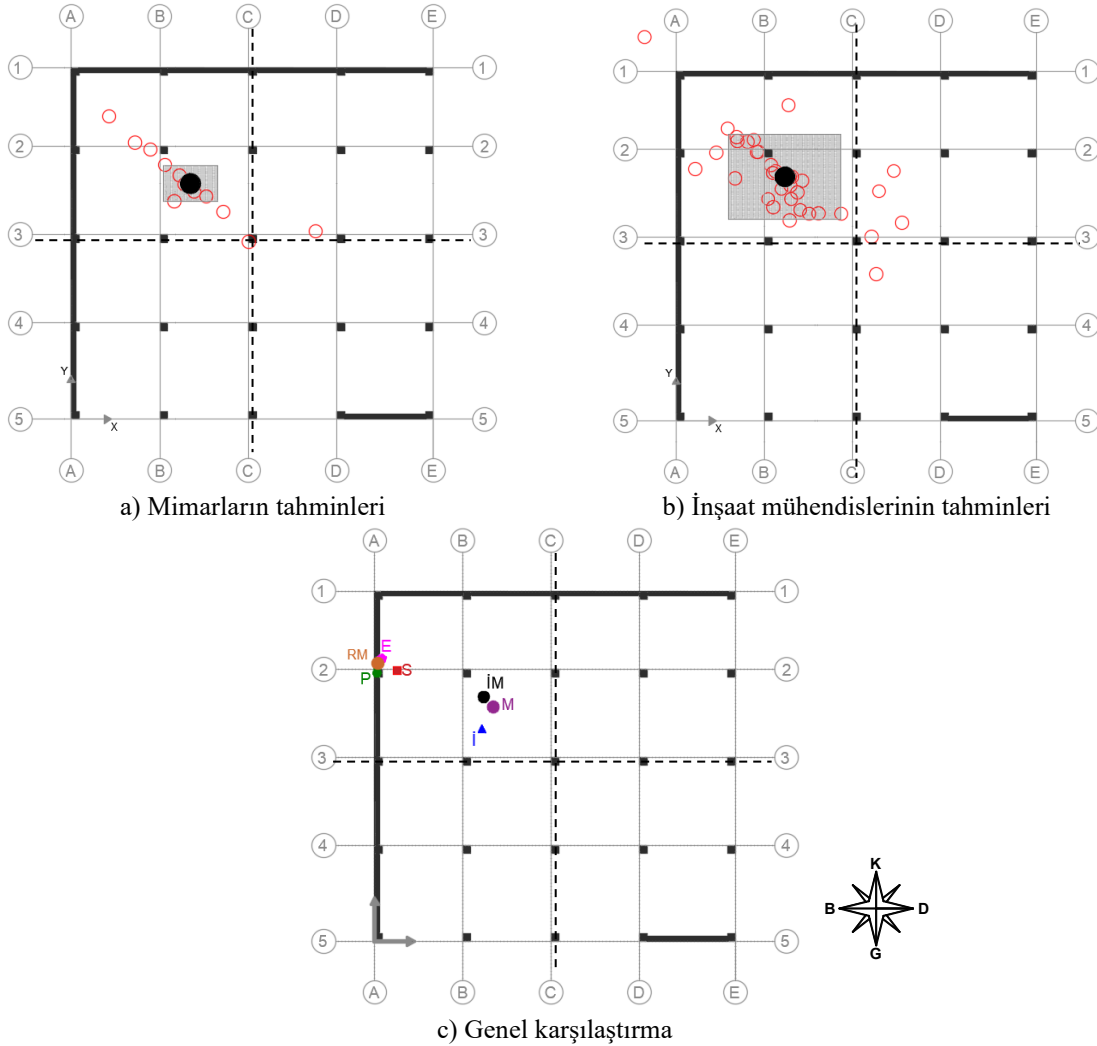


Şekil 14. A1 binası için rijitlik merkezi tahminleri.

A2 binası incelendiğinde mimarların ve inşaat mühendislerinin rijitlik merkezinin çoğunlukla 1. bölgede olduğunu belirttikleri, iki uzun perde duvarın birleştiği köşeye doğru rijitlik merkezi tahminleri yaptıkları, bazı mimarların ve inşaat mühendislerinin kat planı ortasında, 2. bölgede ve 4. bölgede rijitlik merkezini konumlandıkları Şekil 15.a ve b'den görülebilir. Standart sapmalar incelendiğinde inşaat mühendislerinin birbirlerinden çok farklı noktaları rijitlik merkezi olarak tahmin ettikleri belirlenmiştir.

Bu bina yine dört farklı yapısal analiz programı ile analiz edilerek rijitlik merkezi hesaplanmış ve sonrasında laboratuvar ortamında ölçekli bir şekilde deneye tabi tutularak elde edilen rijitlik merkezi konumu Şekil 15.c'de ve Çizelge 13'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 15.c'den görüleceği üzere mimarların ve inşaat mühendislerinin tahminleri İ programı ile elde edilen rijitlik merkezi konumuna yakın olmasına karşın diğer üç programdan elde edilen konumlar ile deneysel çalışma sonucu elde edilen rijitlik merkezinden çok uzaktır. Binanın batı kenarı ile kuzey kenarındaki büyük perde duvarların büyük rijitlikleri sebebi ile binanın diğer bölgelerindeki düşey taşıyıcı elemanların rijitlikleri önemsiz hale gelmiş ve nihayetinde hem deneysel çalışmada hem de S, P ve E

programlarında rijitlik merkezi kuzey batı köşesine yakın (1. bölge) bulunmuştur. Birkaç inşaat mühendisinin deneysel çalışma ile bulunan rijitlik merkezine yaklaştığı Şekil 15.b'den görülebilir. Fakat tahminlerin ortalaması düşünüldüğünde mimarların x yönünde %16, y yönünde %6.2, inşaat mühendislerinin ise nispeten daha iyi tahmin ile x yönünde %14.7 ve y yönünde %4.7 fark ile rijitlik merkezini tahmin ettikleri belirlenmiştir. İ programı ile yapılan analizler neticesinde bulunan rijitlik merkezi deneysel sonuçtan x yönünde %14.4 ve y yönünde %9.3 farklıdır. S, P ve E programlarının rijitlik merkezi hesabının deneysel çalışma ile çok yakın olduğu, en büyük farkın %2.7 olduğu tespit edilmiştir.



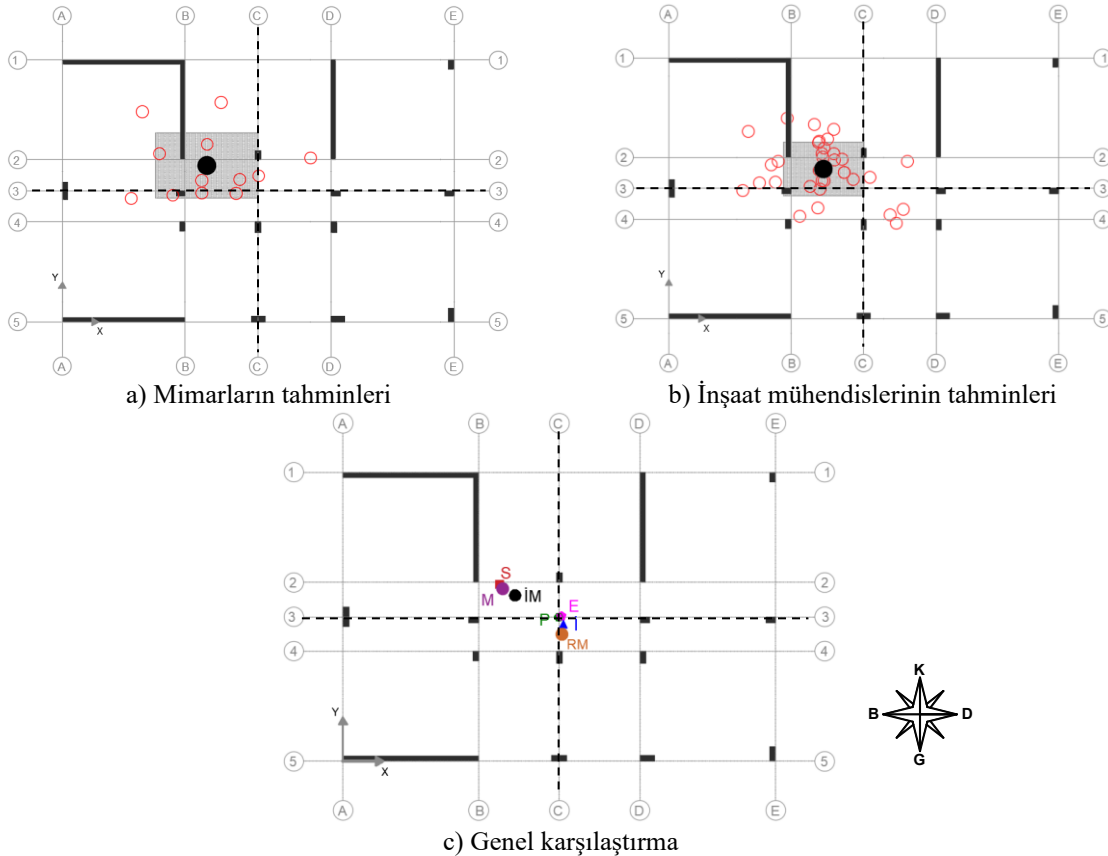
Şekil 15. A2 binası için rijitlik merkezi tahminleri.

Çizelge 13. A2 binasının rijitlik merkezi konumları

	$X_m, m$	$Y_m, m$	$\Delta X, \%$	$\Delta Y, \%$
Deney Sonucu (RM)	0.16	14.20	0.0	0.0
ETABS (E)	0.36	14.46	0.5	0.7
Sta4CAD (S)	1.16	13.84	2.7	1.0
İdeCAD (İ)	5.47	10.86	14.4	9.3
ProtaStructure (P)	0.11	13.73	0.1	1.3
Mimar (M)	6.05	11.98	16.0	6.2
İnşaat Mühendisi (İM)	5.56	12.50	14.7	4.7

Perde duvarlarının her iki eksende ayrı ayrı simetrik yerleştirildiği fakat global anlamda bir simetrikliğin olmadığı A3 binasında mimarlar ve inşaat mühendisleri çoğunlukla rijitlik merkezini 1. bölgede B-C düşey aksı ile 2-3 yatay aksı arasında tahmin etmişlerdir. Sadece bir mimar 2. bölgede, birkaç inşaat mühendisi ise 2, 3 ve 4. bölgede tahminler yapmıştır (Şekil 16.a ve b). Mimarların ve inşaat mühendislerinin ortalama tahminleri yapısal analiz programların sonuçları ve deneysel çalışma sonucu (RM) ile Şekil 16.c ve Çizelge 14'te gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. S haricindeki bütün programların RM'ye yakın konumları rijitlik merkezi olarak belirlediği, farkın maksimum %3.2 olduğu belirlenmiştir. S ile RM arasındaki fark x yönünde 7.2, y yönünde ise 8.7 olarak hesaplanmıştır. Mimarların ve inşaat mühendislerinin tahminleri S'ye yakın olduğundan RM ile benzer uzaklıklara sahip olduğu görülmüştür.

Kat planında her ne kadar perde duvarların kuzey ve batı tarafında yoğunlaştığı gözlenirse de binanın iki ana eksenini olan x ve y doğrultusu ayrı ayrı ele alındığında x doğrultusundaki perde duvarların simetrik olduğu (3 nolu yatay eksen etrafında simetrik), y doğrultusunda uzanan perde duvarlarında da yine simetrik yerleştirildiği (C düşey eksen etrafında simetrik) görülebilir. x yönü doğrultusunda yapılan analizlerde y doğrultusunda uzanan perde rijitliklerinin etkisiz olması, aynı şekilde y yönü doğrultusunda yapılan analizlerde x doğrultusunda uzanan perde rijitliklerinin etkisiz olması sebebi ile yapısal analizler sonucunda rijitlik merkezi kat planının ortasında bulunmuştur. Deneysel çalışmada da yapısal analizler gibi her iki yöndeki yüklemeler ayrı ayrı yapıldığından rijitlik merkezi kat planının ortasında hesaplanmıştır. Dolayısıyla rijitlik merkezinin kuzey-batı tarafına doğru kaydığı gözlemsel olarak değerlendirilmesine rağmen, kat planı x ve y yönlerinde ayrı ayrı değerlendirildiğinde rijitlik merkezi kat planı ortasında olmaktadır.



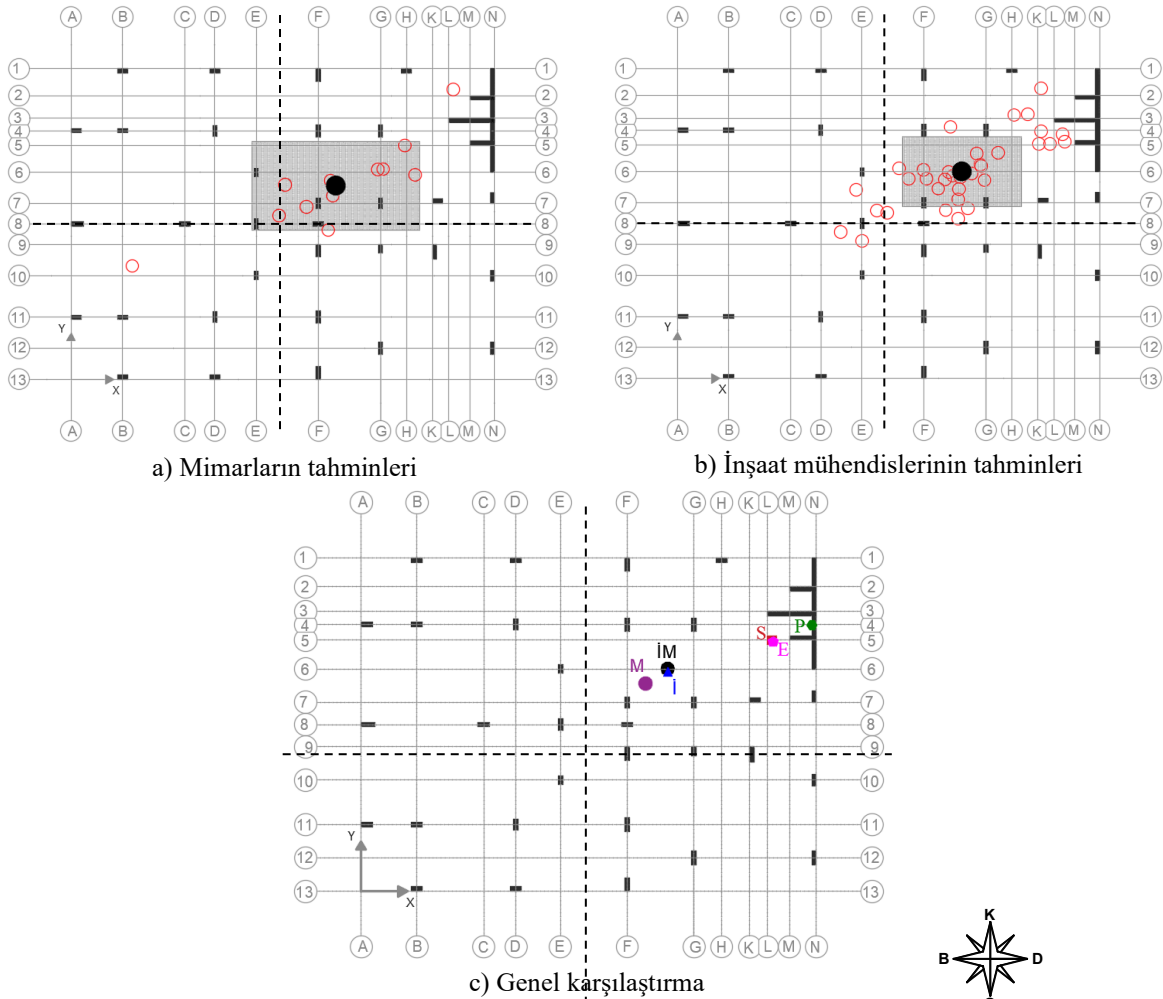
Şekil 16. A3 binası için rijitlik merkezi tahminleri.

Çizelge 14. A3 binasının rijitlik merkezi konumları

	$X_m, m$	$Y_m, m$	$\Delta X, \%$	$\Delta Y, \%$
Deneysel Sonuç (RM)	11.14	6.46	0.0	0.0
ETABS (E)	11.11	7.39	0.1	3.2
Sta4CAD (S)	7.96	9.01	7.2	8.7
İdeCAD (İ)	11.21	6.98	0.2	1.8
ProtaStructure (P)	10.97	7.34	0.4	3.0
Mimar (M)	8.13	8.78	6.8	7.9
İnşaat Mühendisi (İM)	8.75	8.44	5.4	6.7

L1, N1, L6 ve N6 aksları arasında kalan bölgedeki perde duvar grubu inşaat mühendislerinin A4 binası için rijitlik merkezi tahminini mimarlara nispeten daha çok etkilemiştir. Bir mimar 3. bölgede B-10 akslarının kesişimine yakın tahmin yapmış, diğer mimarların tamamı inşaat mühendislerine yakın tahminlerde bulunmuştur (Şekil 17.a ve b).

A4 binası laboratuvar kısıtları sebebi ile deneysel olarak test edilememiştir. Mimarların ve inşaat mühendislerinin tahminlerinin yapısal analiz sonuçları ile kıyaslandığı Şekil 17.c ve Çizelge 15 incelendiğinde M, İM tahminleri ile İ programından elde edilen sonuçların kat planı ortasına yakın olduğu fakat diğer program sonuçlarından çok uzak bir mesafeyi rijitlik merkezi olarak belirledikleri tespit edilmiştir. E, P ve S programları kuzey-doğuda (2. bölgede) yer alan perde grubunda rijitlik merkezinin bulunduğu belirtmişlerdir. E programı ile elde edilen sonuç referans alındığında S'nin hemen hemen aynı noktayı belirlediği, P programının E'ye yakın olduğu ve aradaki farkın x yönünde %4.3, y yönünde ise %2.5 olduğu görülmüştür. M, İM tahminleri ile İ sonucunun x yönünde maksimum %14, y yönünde ise maksimum %6.2 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 17. A4 binası için rijitlik merkezi tahminleri.



Çizelge 15. A4 binasının rijitlik merkezi konumları

	$X_m, m$	$Y_m, m$	$\Delta X, \%$	$\Delta Y, \%$
ETABS (E)	18.51	11.22	0.0	0.0
Sta4CAD (S)	18.45	11.29	0.1	0.2
İdeCAD (İ)	13.78	9.8	11.6	4.7
ProtaStructure (P)	20.26	11.97	4.3	2.5
Mimar (M)	12.78	9.35	14.0	6.2
İnşaat Mühendisi (İM)	13.77	10.01	11.6	4.0

#### 4. Sonuçlar

Bina tasarımında en önemli aşamalardan biri mimari tasarım aşamasıdır. Mimari tasarımda yerleştirilen düşey taşıyıcı sistem elemanlarının burulmaya müsait bir biçimde yerleştirilmesi statik tasarımda gözden kaçırıldığında bina olası bir depremde önemli burulma momentlerine maruz kalarak taşıyıcı elemanların ilave kesme kuvvetleri ile zorlanmasına yol açmaktadır. Bu sebeple tasarıma başlamadan önce kütle ve rijitlik merkezlerinin gözlemsel olarak belirlenebilmesi, tasarım sırasında ve yapısal analiz aşamasında hesaplanan kütle ve rijitlik merkezlerinin iyi yorumlanması binanın deprem esnasında daha iyi performans göstermesine katkı sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında öncelikle mimar ve inşaat mühendislerine dört adet betonarme bina kat planı verilerek kütle ve rijitlik merkezinin konumunu gözlemsel olarak belirlemeleri istenmiştir. Daha sonra bu binaların tamamı mevcutta sıklıkla kullanılan dört adet yapısal analiz programı ile 3 boyutlu olarak modellenmiş ve kütle ve rijitlik merkezleri belirlenmiştir. Son olarak 3 adet bina ölçekli olarak laboratuvar ortamında test edilmiş ve rijitlik merkezi deneysel olarak belirlenmiştir. Yapılan analizler ve değerlendirmeler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kütle merkezleri için mimar ve inşaat mühendislerinin tahminlerinin yapısal analiz programlarına çok yakın olduğu ve yapısal analiz programlarının da kendi içlerinde birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Tipik bir betonarme bina kütlelerinin büyük bir kısmını döşemeler oluşturduğundan kütle merkezi genel olarak kat planı merkezine yakın olmaktadır. Perde duvarların kütle üzerindeki etkinliği planda döşemeler kadar olmadığından kütle merkezi çok fazla perde duvar yerleşiminden çok az etkilenmektedir. Bu sebeplerden dolayı mimar ve inşaat mühendisleri gözlemsel değerlendirmelerinde kat planı merkezine yakın noktaları kütle merkezi olarak tahmin etmekte ve hata oranlarının kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla gözlemsel olarak kütle merkezi konumunun tahmin edilebileceği belirlenmiştir.
- Rijitlik merkezinin düşey taşıyıcı sistem elemanlarının yerleşiminden ve boyutlarından doğrudan etkilenmesi sebebi ile mimarların ve inşaat mühendislerinin ortalama tahminlerinin deneysel çalışmalar sonucu elde edilen rijitlik merkezi konumundan çok farklı olduğu görülmüştür. Tahminlerde kat planının global olarak ele alınmasının bu farklılıkta rol aldığı söylenebilir. Çünkü yapısal analiz programları rijitlik merkezini belirlerken binanın x ve y yönleri için ayrı ayrı hesap yapmakta ve her iki ekseninde ayrı ayrı simetrik yerleşim durumunda rijitlik merkezini kat planı ortasında hesaplayabilmektedir.
- Mimarların ve inşaat mühendislerinin ortalama tahminleri düşünüldüğünde genel olarak benzer tahminler yaptıkları, bazı mimar ve mühendislerin ortalamadan çok uzak mesafelerde rijitlik merkezini belirledikleri belirlenmiştir.
- Yapısal analiz programlarından ETABS, Sta4CAD ve ProtaStructure'ın birbirine benzer konumları rijitlik merkezi olarak belirlemesine karşın, İdeCAD programından elde edilen sonuçların farklı olduğu görülmüştür. İdeCAD, kolonların ve perde duvarların ilgili deprem doğrultusundaki kesme kuvvetlerinin bileşkesinin konumunu rijitlik merkezi olarak hesapladığını belirtmesine rağmen kesme kuvvetlerin dağılımının yeterli doğrulukta yapılamaması sebebi ile bileşke kuvvetin konumu da diğer programlardan farklı olduğu düşünülmektedir.
- Deneysel çalışma ile yapısal analiz programlarının birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlemlendiğinden özellikle asimetric taşıyıcı sistem elemanlarına sahip binaların ölçekli modelleri hazırlanarak rijitlik merkezinin bulunabileceği görülmüştür.

## Teşekkür

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2022-9987 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

## Kaynakça

- Aksoy, E. (2023). *Binalarda rijitlik merkezinin deneysel olarak belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye.
- Aksoy, E., Korkut, F., & Erdil, B. (2022). Betonarme binalarda rijitlik merkezi problemi. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 383-404. doi:10.55007/dufed.1183321
- Aktan, S., & Kırac, N. (2010). Betonarme binalarda perdelerin davranışa etkileri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 15-32.
- As, N., Dündar, T., Büyüksarı, U., & Akkılıç, H. (2009, April). *Effect of some production parameters on dynamic modulus of elasticity of medium density fiberboard*. COST E49 Processes and Performance of Wood-Based Panels, İstanbul, Turkey.
- Basu, D., & Jain, S. K. (2007). Alternative method to locate centre of rigidity in asymmetric buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(7), 965-973. doi:10.1002/eqe.658
- Bosco, M., Marino, E. M., & Rossi P. P. (2013). An analytical method for the evaluation of the in-plan irregularity of non-regularly asymmetric buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(5), 1423-1445. doi:10.1007/s10518-013-9438-3
- Cheung, V. W. T., & Tso, W. K. (1986). Eccentricity in irregular multistory buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 13(1), 46-52. doi:10.1139/l86-007
- Doudoumis, I. N., & Doudoumis, N. I. (2017). Centres of rigidity in multi-storey asymmetric diaphragm systems for general lateral static loading. *Engineering Structures*, 150, 39-51. doi:10.1016/j.engstruct.2017.06.072
- Erdem, H. (2016). Burulma düzensizliğinin betonarme yapı davranışına etkileri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 459-468. doi:10.21605/cukurovaummfd.319360
- Erdil, B., & Gündüz, Y. (2021). Betonarme binalar için perde duvar etkinliğinin belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 655-669. doi:10.17798/bitlisfen.898353
- ETABS. (2021). Computers and Structures Inc. v19.1.0. Berkeley, Kaliforniya.
- Georgoussis, G. K. (2010). Modal rigiditycenter: it's use for assessing elastic torsion in asymmetric buildings. *Earthquakes and Structures*, 1(2), 163-175. doi:10.12989/eas.2010.1.2.163
- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1993). Seismic code analysis of buildings without locating centers of rigidity. *Journal of Structural Engineering*, 119(10), 3039-3055. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:10(3039)
- Hejal, R., & Chopra, A. K. (1987). Earth quake response of torsionally-coupled buildings (Report No. UCB/EERC-87/20). Berkeley, CA, USA: University of California. <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NSF/PB90208638.pdf>
- İdeCAD. (2020). İde Yapı 10.20. Bursa, Türkiye.
- İdemen, A. E. (2003). *Bina ağırlık merkezi - rijitlik merkezi ilişkisini mimari tasarım aşamasında kuran bir uzman sistem*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kınık, K. E. (2019). *Betonarme binaların taşıyıcı sistem seçiminde perde yerleşiminin davranışa etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Ko, D. W., & Lee, H. S. (2006). Shaking table tests on a high-rise RC building model having torsional eccentricity in soft lower storeys. *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 35(11), 1425-1451. doi:10.1002/eqe.590
- Mirbolouk, P., & Roohnia, M. (2015). Evaluation of dynamic modulus of elasticity of medium density fiberboard panel from longitudinal vibration tests on specimens. *BioResources*, 10(1), 613-621. doi:10.15376/biores.10.1.613-621

- Newaz, G., Mayeed, M., & Rasul, A. (2016). Characterization of balsa wood mechanical properties required for continuum damage mechanics analysis. *Journal of Materials: Design and Applications*, 230(1), 206-218. doi:10.1177/1464420714564711
- ProtaStructure. (2021). Prota Yazılım 5.1.290. Ankara, Türkiye.
- Sezer, E. (2006). *Yapı sistemlerinde burulma düzensizliğini etkileyen parametrelerin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, Türkiye.
- Sta4CAD. (2019). Sta Bilgisayar Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şt. v14.1. İstanbul, Türkiye.
- Stathi, C. G., Bakas, N. P., Lagaros, N., & Papadrakakis, M. (2015). Ratio of Torsion (ROT): An index for assessing the global induced torsion in plan irregular buildings. *Earthquakes and Structures*, 9(1), 145-171. doi:10.12989/eas.2015.9.1.145
- TBDY. (2018). Türkiye bina deprem yönetmeliği: Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar. *Resmi Gazete (Sayı: 30364 (Mükerrer))*. Erişim Adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>
- TS498. (2021). *Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri*. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.
- Wu, C., Vahedi, N., Vassilopoulos, A. P., & Keller, T. (2020). Mechanical properties of a balsa wood veneer structural sandwich core material. *Construction and Building Materials*, 265, 120193. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120193
- Yener Demirci, H. (2016). *Asimetrik betonarme yapıların deprem davranışı*. (Yüksek Lisans Tezi), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.



Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

**Biyolojik Yöntemle Üretilmiş Gümüş Nanopartiküllerin *In Vitro* Koşullarda *Digitalis purpurea* Kallus ve Kök Oluşumları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi**

**Pınar NARTOP\*, Özge Nur YÜKSEL, Dilara Özge ŞENCAN**

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 59860, Çorlu, Tekirdağ, Türkiye

Pınar NARTOP, [ORCID No: 0000-0003-2765-6133](https://orcid.org/0000-0003-2765-6133), Özge Nur YÜKSEL, [ORCID No: 0000-0001-8981-6820](https://orcid.org/0000-0001-8981-6820), Dilara Özge ŞENCAN, [ORCID No: 0000-0003-1081-8685](https://orcid.org/0000-0003-1081-8685)

\*Sorumlu yazar e-posta: pnartop@nku.edu.tr

**Makale Bilgileri**

Geliş: 14.07.2022  
Kabul: 10.02.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1143944](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1143944)

**Anahtar Kelimeler**

Biyo-AgNP,  
Biyolojik sentez,  
*Digitalis purpurea*,  
Kallus,  
Kök,  
*Syzygium aromaticum*

**Öz:** Gümüş nanopartikülleri teknolojinin farklı alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Biosistemler üzerinde de önemli ve faydalı etkileri bulunmaktadır. Ancak, etkileri yeterli derecede çalışılmamıştır. Biyo-AgNP'lerin *in vitro* koşullardaki bitki dokularının ve hücrelerinin gelişimi üzerinde arttırıcı etkileri bulunmaktadır. Bu sebeple, yüksek fiyatlı bitki büyüme düzenleyicilerine alternatif olarak kullanılabilirler. Bu çalışmanın amacı, *Digitalis purpurea* gövde eksplantlarında farklı konsantrasyonlardaki (0-30 mg/L) biyo-AgNP'lerin etkilerini incelemektir. Bu amaçla, kallus ve kök oluşumları ve eksplant kararmaları izlenmiştir. Biyo-AgNP'lerin kallus oluşumuna etkisi olumsuzdur. 1 mg/L biyo-AgNP içeren besin ortamı hariç, kallus oluşum yüzdelerinin hepsi kontrol grubundan daha azdır. Kök oluşum yüzdeleri, 15 ve 20 mg/L biyo-AgNP içeren besin ortamlarında (sırasıyla %42.22 ve %46.67) kontrole göre (%35.56) daha yüksek bulunmuştur. Kallus oluşumlarının tersine, kök oluşumları kararmadan olumsuz etkilenmemiştir. Bu sonuçlar *in vitro* koşullarda hücre çoğalması ve doku rejenerasyonunun biyo-AgNP'lerden ve onların konsantrasyon yoğunluğundan farklı şekilde etkilendiğini göstermektedir.

**Investigation of Biologically Synthetized Silver Nanoparticles' Effects on Callus and Root Formations of *D. purpurea* in *In Vitro* Conditions**

**Article Info**

Recieved: 14.07.2022  
Accepted: 10.02.2023  
Online August 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1143944](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1143944)

**Keywords**

Bio-AgNP,  
Biological synthesis,  
Callus,  
*Digitalis purpurea*,  
Root,  
*Syzygium aromaticum*

**Abstract:** Silver nanoparticles are frequently used in many areas of technology. They also have some important and beneficial impacts on biosystems. However, their effects are not studied sufficiently. Bio-AgNPs have boosting effect on growth of plant tissues and cells in *in vitro* conditions. Therefore, they can be used as an alternative for expensive plant growth regulators. This study investigates the effects of different bio-AgNP concentrations (0-30 mg/L) on *Digitalis purpurea* stem explants. For this purpose, callus and root formations and explant browning were observed. Bio-AgNPs had negative effects on callus formations. Callus formation percentages were lower than the control except the medium supplemented with 1 mg/L bio-AgNP. Root formation percentages were found higher than the control (35.56%) at 15 and 20 mg/L bio-AgNP concentrations (42.22% and 46.67%, respectively). Contrary to callus formations, browning did not negatively affect root formations. These results showed that cell proliferation and tissue regeneration in *in vitro* conditions were affected distinctively by bio-AgNPs and their concentrations.

## 1. Giriş

*Digitalis purpurea* L. *Scrophulariaceae* familyasına ait olan ve konvansiyonel olarak Eski Mısır ve Roma İmparatorluğu döneminden beri tedavide kullanılan ilk bitkilerden biridir. Avrupa'da ve Amerika'da yabancı olarak yetişen bitki ülkemizde de bahçelerde süs bitkisi olarak yetiştirilmektedir. Bitkinin yapraklarında üretilen kardenolitler kardiyotonik glikozitler olarak bilinmektedirler. Bu bileşiklerin en önemlileri dijitoksin ve digoksin'dir. Bu bileşikler kalp yetmezliği ve kalp ritm bozukluklarının tedavisinde kullanılırlar (Perez-Alonso ve ark., 2018; Jograna ve ark., 2020). *D. purpurea* kendine has sekonder metabolitlerden dolayı farmasotik endüstrisinin en çok ilgilendiği bitkilerden biridir ve bilimsel çalışmaların da sıklıkla konusu olmaktadır. Yapılan çalışmalarda bitkiden elde edilen biyokütlenin ve sekonder metabolitlerinin miktarının artırılması amaçlanmaktadır (Patil ve ark., 2013; Perez-Alonso ve ark., 2018).

Bitki hücre ve doku kültürleri bitkisel biyokütlenin ve sekonder metabolit içeriklerin artırılmasına yönelik farklı yaklaşımlar sunmaktadır. Farklı dokular kullanılarak başlanan çalışmalarda en uygun eksplant tipi, besin ortamı ve kültür koşulları belirlenerek verim artırılabilir ve büyük ölçekte üretime geçilebilmektedir. Bitki hücre ve doku kültürünün en büyük avantajlarından biri mevsimsel koşullardan ve diğer dış faktörlerden bağımsız olmasıdır. Uygun eksplant tipi, besin ortamı ve kültür koşulları belirlendikten sonra yılın on iki ayı boyunca *in vitro* koşullarda bitkisel üretim kesintisiz olarak laboratuvar koşullarında ya da üretime uygun olarak kurulmuş tesislerde gerçekleştirilebilmektedir. *In vitro* koşullarda bitkisel üretim tekniğinde biyokütleyi arttırmak ve içeriğini zenginleştirmek için oksin ve sitokinin grubu bitki büyüme düzenleyicileri kullanılmaktadır. Bu bileşikler miligram düzeyinde kullanılmalarına rağmen, en büyük maliyet kalemlerinden biridirler. Bu sebeple alternatif arayışlar devam etmektedir (Nartop, 2018a).

Gümüş nanopartiküller boyutları 100 nm'yi geçmeyen nanomalzemelerdir. Farklı yöntemlerle üretimleri gerçekleştirilebilse de, maliyet, hız ve ölçek büyütmedeki pratiklik açısından en çok tercih edilen yöntem yeşil sentez olarak da bilinen biyolojik sentez yöntemidir (Sintubin ve ark., 2012; Tran ve ark., 2013). Biyolojik sentez yönteminde doğal kaynaklardan (bitki ve alg gibi) elde edilen sıvı ekstreler gümüş nitrat çözeltisiyle belli oranlarda karıştırılarak çözelti içerisindeki gümüş iyonunun ekstredeki metabolitlerle (fenolik bileşiklerle) reaksiyona girerek indirgenmesi sağlanmakta ve süreç tamamlandığında biyolojik gümüş nanopartiküller (biyo-AgNP) elde edilmektedir (Dhoondia & Chakraborty, 2012; Yasin ve ark., 2013).

Gümüş nanopartiküller bitki biyoteknolojisinde kullanılmakta ve olumlu sonuçlar elde edilmektedir. Biyolojik sentezle elde edilen gümüş nanopartiküllerin diğer yöntemlerle elde edilenlere göre bitki hücre ve doku kültürlerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir (Begum ve ark., 2020). Ayrıca, yüzeysel sterilizasyonda kullanıldıklarında bitki eksplantlarında kararmanın engellendiği ve kallus oluşumunun arttırdığı da tespit edilmiştir (Nartop, 2017).

Bu çalışmanın amacı *D. purpurea* gövde eksplantlarının *in vitro* koşullarda biyo-AgNP'lere verdiği tepkileri incelemektir. Eksplantlar dört hafta süresince besin ortamı içerisinde 0-30 mg/L konsantrasyonlarda biyo-AgNP'lere maruz bırakılmıştır. Kültür sürecinin sonunda eksplantlardaki kallus ve kök oluşum yüzdelerinin yanı sıra kararma yüzdeleri belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Bitkisel materyal

Çalışmamızda *in vitro* koşullarda %3 sükröz ve %0.6 agar içeren pH'ı 5.8 olarak ayarlanmış Woody Plant Medium (WPM) besin ortamında dört haftalık aralıklarla altkültürü yapılan *Digitalis purpurea* bitkiciklerinden elde edilen gövde eksplantları kullanılmıştır (Lloyd & McCown, 1980). Gümüş nanopartiküllerin biyosentetik yöntemle elde edilmesinde biyolojik indirgeyici (biyoredüktör) olarak kurutulmuş karanfil (*Syzygium aromaticum*) çiçekleri kullanılmıştır (Nartop, 2019).

### 2.2. Biyolojik indirgeyicinin hazırlanması

Biyolojik indirgeyici olarak kullanılan karanfil çiçeği ekstresi dekoksasyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Kurutulmuş karanfil çiçekleri çeşme suyunda iyice yıkandıktan sonra bir kez de distile

su ile yıkandıktan sonra kurutulmaya bırakılmışlardır. Havanda ezilen kurumuş karanfil çiçeklerinin 5 g'ı 100 ml distile su içerisinde su banyosunda 80°C'de 1 saat bekletilmişlerdir. Elde edilen dekoksiyon sıcakken filtre kağıdından süzölmüş ve oda sıcaklığında (24±1°C) soğumaya bırakılmıştır (Nartop, 2019; Nartop & Günbeldek, 2020).

### 2.3. Gümüş nanopartiküllerin (biyo-AgNP) biyosentetik yöntemle elde edilmesi

Soğutulmuş karanfil çiçeği ekstresinin 5 ml'si 1 mM gümüş nitrat çözeltisinin 95 ml'si bir erlende çalkalanarak karıştırılmıştır. 24 saat sonra biyolojik indirgenme tamamlandıktan sonra elde edilen koloidal çözelti içerisindeki biyo-AgNP'ler 5000 rpm'de 3 kez santrifüjlenerek distile su ile yıkanmışlardır. Çöktürülen biyo-AgNP'ler kurutulduktan sonra aşağıda belirtilen miktarlarda besin ortamlarına eklenmişlerdir (Sinha & Paul, 2014; Nartop & Günbeldek, 2020).

### 2.4. Biyo-AgNP'lerin karakterizasyonu

Biyo-AgNP'lerin oluşumunun tespit edilmesi için renk ve pH değişimleri, UV-Vis spektrofotometri ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Karışımın ilk ve son hallerinin renk değişimleri gözlemlen ve pH değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. 24 saat sonunda elde edilen biyo-AgNP'lerin 280-500 nm dalga boyları arasındaki absorpsanları spektrofotometrede (Shimadzu UV-1201V) okunarak kromatogramları elde edilmiştir. Distile su kör olarak kullanılmıştır. Biyo-AgNP'lerin büyüklük ve şekillerinin belirlenmesi için taramalı elektron mikroskopu (FEI-QUANTA FEG 250) kullanılmıştır (Nartop, 2018b).

### 2.5. Besin ortamının hazırlanması

Çalışmamızda %3 sükröz ve %0.6 agar içeren WPM besin ortamı kullanılmıştır. Besin ortamı içerisine kallus ve kök oluşumunu teşvik üzere 0,1 mg/L 2,4-dihidroksibenzaldehit (2,4-D), 0,5 mg/L 6-benziladenin (BA), 0,5 mg/L kinetin eklenmiştir. Biyo-AgNP'lerin etkisini belirlemek için ise 1, 5, 10, 15, 20 ve 30 mg/L konsantrasyonlarda (NP1, NP5, NP10, NP15, NP20 ve NP30) biyo-AgNP eklenmiştir ve pH'ları 5.8'e ayarlanmıştır. Kontrol olarak biyo-AgNP içermeyen besin ortamı (NP0) kullanılmıştır. Yarı-katı besin ortamları 15 dakika boyunca 121°C'de 1.2 kg/cm<sup>3</sup> basınç altında otoklavda steril edildikten sonra kullanılmışlardır.

### 2.6. Kültürlerin oluşturulması ve kültür koşulları

*D. purpurea* bitkiciklerine ait gövde eksplantları 0.5-1 cm uzunluğunda kesilerek yukarıda belirtilen besin ortamları içerisine alınmışlardır. Gövde eksplantları dört hafta boyunca 16 saat aydınlık/8 saat karanlık fotoperiyotta 4000 lüks ışık altında 24±1°C'de kültive edilmişlerdir. Dört hafta sonunda gövde eksplantlarının kallus ve kök oluşturma yüzdelerinin yanı sıra eksplant karama yüzdeleri de kaydedilmiştir.

### 2.7. İstatistiksel değerlendirme

Çalışmamızdaki tüm denemeler tek faktörlü (besin ortamı) tesadüf parselleri deneme desenine göre üç tekrarlı olarak kurulmuştur ve her tekrarda 20 eksplant kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar tek yönlü ANOVA testi ile değerlendirilmiştir. Ortalamaların karşılaştırılması için TUKEY testi kullanılmıştır (p<0.05).

## 3. Bulgular ve Tartışma

Biyo-AgNP'lerin elde edilmesi sırasında bitki ekstresi ile gümüş nitrat çözeltisinin ilk karıştırıldığı andan itibaren biyo-AgNP'ler oluşmaya başladığı için renk değişimi gözle görülebilir durumdadır. Karıştırma gerçekleştikten sonraki 15 dakika içerisinde karışımın renginin koyulaşmaya başladığı, 2 saat sonra ise karakteristik rengini aldığı tespit edilmektedir. Çalışmamızda kullandığımız karanfil ekstresi ve gümüş nitrat ilk karıştırıldığında rengi açık sarıdır, 24 saat sonrasında iyice

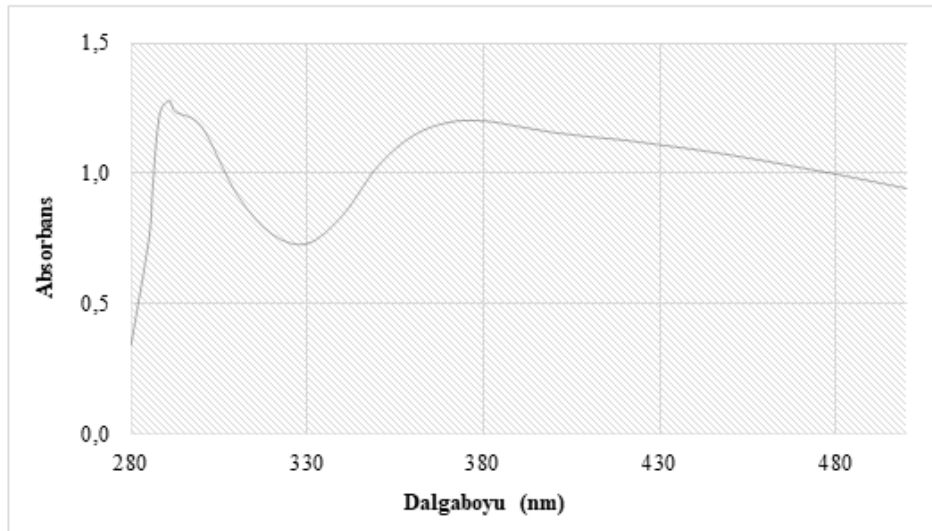


koyulaşarak siyaha yakın bir renge dönmekte ve koloidal form almaktadır. Biyo-AgNP'lerin oluşumu sırasında benzer renk değişimleri, renk koyulaşmaları ve koloidal çözelti elde edilmesi [Sinha & Paul \(2014\)](#) tarafından da bildirilmiştir.

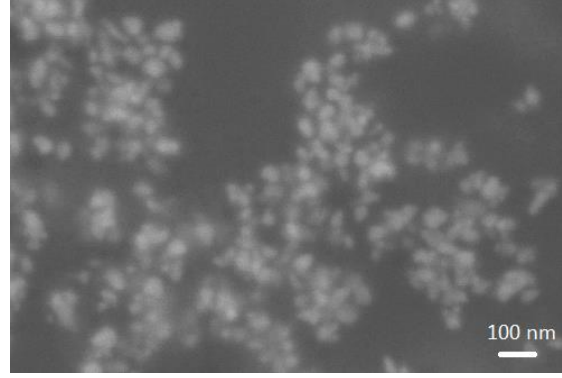
Karışımın pH değerindeki değişiklik, karışım içerisinde biyolojik indirgenmenin gerçekleştiğini gösteren, renk değişiminden sonraki ikinci belirtidir. Karışımın pH değeri, karıştırıldığı ilk anda 5,01 iken, 24 saatin sonunda koloidal çözelti oluştuğunda 3.86'ya düşmüştür. Benzer pH değişiklikleri biyolojik sentezle gümüş nanopartikül elde etme çalışmalarında da rapor edilmiştir ([Amin ve ark., 2012](#); [Kumar ve ark., 2017](#)). On iki farklı tıbbi bitki ile yapılan çalışmada, biyo-AgNP elde edilmesi sürecinde her bitkiden elde edilen koloidal çözeltide pH değerlerinin düşüş gösterdiği tespit edilmiştir ([Nartop, 2019](#)).

Karanfil çiçeği ekstresinden elde edilen biyo-AgNP'lere ait kromatogram Şekil 1'de verilmiştir. Karanfil çiçeği ekstresi kullanılarak elde edilen biyo-AgNP'ler 289 nm'de karakteristik pik vermişlerdir. Şekil 2'te biyo-AgNP'lerin taramalı elektron mikroskobundan elde edilen görüntülerinde, nanopartiküllerin küre şeklinde ve 100 nm'den küçük oldukları belirlenmiştir.

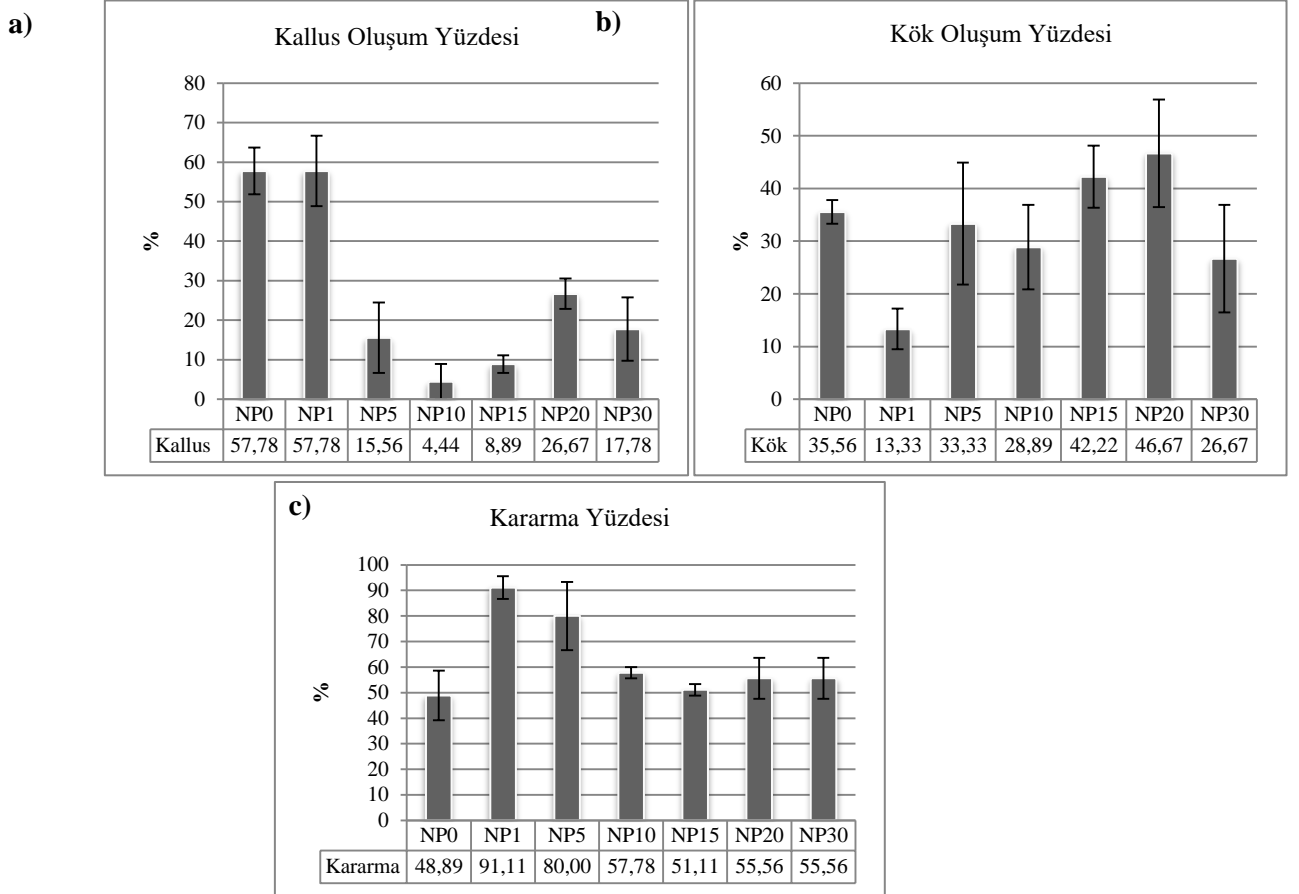
*D. purpurea* gövde eksplantlarının kallus oluşum yüzdeleri %4.44-57.78 aralığında tespit edilmiştir (Şekil 3a). Elde edilen veriler biyo-AgNP'lerin konsantrasyonlarına bağlı olarak istatistiksel açıdan farklılık göstermiştir. NP0 ve NP1 besin ortamlarında kallus oluşum yüzdesi en yüksek seviyededir ve istatistiksel olarak birinci gruptadır (%57.78). Kallus oluşum yüzdesi NP20 besin ortamında %26.67'dir ve istatistiksel olarak ikinci gruptadır. Diğer besin ortamlarından elde edilen yüzdelere ise üçüncü grupta yer almaktadır. Biyo-AgNP konsantrasyonundaki artış kallus oluşma oranında azalmaya sebep olmuştur. En düşük değer NP10 ortamında %4.44 olarak tespit edilmiştir. NP20 besin ortamında hafif bir artış görülmekle birlikte biyo-AgNP konsantrasyonu 30 mg/L'ye yükseldiğinde kallus oluşum yüzdesi tekrar düşüşe geçmiştir. Biyo-AgNP kullanımı *D. purpurea* gövde eksplantlarında kallus oluşumunu teşvik etmemiştir. Daha önce *Rubia tinctorum* ile yaptığımız çalışmada gövde eksplantlarında kallus oluşumu biyo-AgNP'ler tarafından teşvik edilmiştir ([Nartop ve ark., 2023](#)). 20 mg/L konsantrasyon hariç, 1-30 mg/L konsantrasyonlarda kullanılan biyo-AgNP'lerin bulunduğu besin ortamlarında kallus oluşum yüzdeleri kontrol grubundan yüksek çıkmıştır. En yüksek kallus oluşum yüzdesi düşük konsantrasyonlarda (1, 5 ve 10 mg/L), en düşük yüzde ise 20 mg/L konsantrasyonda tespit edilmiştir. [Begum ve ark. \(2020\)](#) *Fagonia indica* kallus kültürlerinde biyokütle artışının biyo-AgNP'ler tarafından tetiklendiğini bildirmiştir. Kallus oluşumları uygulanan biyo-AgNP konsantrasyonuna ve bitki türüne göre farklılık göstermektedir.



Şekil 1. Karanfil çiçeği ekstresinden elde edilen biyo-AgNP'lere ait UV-Vis kromatogramı.



Şekil 2. Biyo-AgNP'lerin SEM görüntüleri.

Şekil 3. *Digitalis purpurea* kültürlerinde 0, 1, 5, 10, 15, 20 ve 30 mg/L biyo-AgNP konsantrasyonlarındaki besin ortamlarında kallus (a) ve kök (b) oluşum yüzdeleri ve eksplant kararma (c) yüzdeleri.

Biyo-AgNP konsantrasyonlarına bağlı olarak eksplantlar üzerinde kök oluşumları yüzdelerindeki farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır (Şekil 3b). Kök oluşum yüzdeleri %13.33-46.67 arasındadır. En yüksek kök oluşumu NP20 besin ortamında tespit edilmiştir ve kontrol grubuna göre %31 daha fazladır. NP15 besin ortamında ise kontrol grubuna göre %18.7 daha fazla kök oluşum yüzdesi tespit edilmiştir. En düşük kök oluşum yüzdesi ise NP1 besin ortamında tespit edilmiştir ve yaklaşık %38 daha azdır. Elde edilen sonuçlara göre, kök oluşum yüzdeleri 15 mg/L biyo-AgNP konsantrasyonundan sonra artış göstermiş ancak konsantrasyon 20 mg/L biyo-AgNP'nin üzerine çıktığında düşüşe geçmiştir. *Lavandula officinalis* nod kültürlerinde yaptığımız çalışmada, düşük konsantrasyonlarda kullanılan (1-4 mg/L) biyo-AgNP'ler tekli sürgün oluşumunu ve ortalama

nod uzunluğunu artırırken, çoklu sürgün ve kök oluşumunu azaltmıştır (Nartop & Günbeldek, 2020). *Arabidopsis thaliana*'da yapılan çalışmada ise kullanılan doza bağlı olarak bitkiciklerde kök uzunluğunun inhibe edildiği tespit edilmiştir (Qian ve ark., 2013). Muzda yapılan çalışmada 4 ppm AgNP'nin köklenme ve kök uzunluğu açısından en uygun konsantrasyon olduğu tespit edilmiştir (Huong ve ark., 2021). *Panax vietnamensis*'in *in vitro* rizom rejenerasyonu çalışmasında 1.2 mg/L AgNP konsantrasyonunun kontrole göre daha iyi sonuç verdiği rapor edilmiştir (Cuong ve ark., 2021). *D. purpurea* nod kültürlerinde yaptığımız çalışmada ise, oluşan bitkiciklerin kök oluşum oranı 2 mg/L biyo-AgNP konsantrasyonunda en yüksektir (Nartop ve ark., 2021). Görüldüğü üzere, kök oluşumu bitki türüne ve kullanılan biyo-AgNP konsantrasyonuna göre farklılık göstermektedir.

Kültüre alınan ekplantlardaki kararma bitki hücre ve doku kültürlerindeki gelişmeyi engelleyen faktörlerden biridir (Jones & Saxena, 2013). *D. purpurea* gövde eksplantlarındaki kararma durumları incelendiğinde elde edilen yüzdeler arasında istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 3c). En düşük kararma yüzdesi kontrol grubunda (%48.89) tespit edilmiştir ve NP15 besin ortamı ile (%51.11) istatistiksel olarak son gruptadır. 15 mg/L'nin altında ve üstünde olan biyo-AgNP konsantrasyonları eksplantlarda kontrole grubuna göre daha yüksek kararmalara sebep olmuştur. NP5, NP10, NP30 besin ortamları kararma yüzdeleri açısından ikinci gruptadırlar. En yüksek kararma oranı (%91.11) ise NP1 besin ortamında tespit edilmiştir ve istatistiksel olarak birinci gruptadır. Eksplantlardaki kararma yüzdesi NP1 besin ortamında en yüksek seviyede olmasına rağmen kallus oluşumu engellenmemiştir. Eksplantlar NP1 besin ortamında kök oluşumu yerine kallus oluşumuna yönlendirilmiştir. 1 mg/L biyo-AgNP'den daha yüksek konsantrasyonlarda ise, eksplantlar kontrol grubuna göre daha yüksek kararma yüzdelerine sahip olmalarına rağmen kök oluşum yüzdeleri artmıştır. Bu durum, biyo-AgNP'lerin kararmaya rağmen kök oluşumunu teşvik ettiğini göstermektedir. *Pyracantha coccinea* gövde eksplantlarının yüzeysel sterilizasyonunda *Alkanna tinctoria* ekstresinden elde edilen biyo-AgNP'lerin kullanıldığı çalışmada eksplantların sadece bisturi ile kesilen kısımlarında kararmalar görüldüğü, NaOCl uygulamasında ise tüm eksplantların kültürün üçüncü gününde karardığı tespit edilmiştir (Nartop, 2017). Benzer bir bulgu, yüksek oranda fenolik bileşik içermesinden dolayı *in vitro* koşullarda ortaya çıkan kararmaların gelişmeyi engellediği *Rosmarinus officinalis* gövde eksplantlarının yüzeysel sterilizasyonun biyo-AgNP'lerle yapıldığı çalışmada da görülmektedir. %97'ye varan sterilizasyon başarısının yanı sıra eksplantlarda kararma gözlenmemiş ve tüm steril eksplantlarda kallus olumu tespit edilmiştir (Nartop, 2018c). Biyo-AgNP'lerin eksplant kararmasını engelleyebildiği görülmektedir. Çalışmamızda elde edilen sonuçlarda ise kararmayı engellemese de kök oluşumunu teşvik edebileceği görülmüştür.

#### 4. Sonuç

Biyo-AgNP'ler çok farklı alanlarda kullanılabilen nanomalzemelerdir. Üretim maliyetleri ucuzdur. Elde edilme süreçleri kısadır ve büyük ölçekte üretime uyarlanması çok kolaydır. Nanobiyoteknoloji alanında da sıklıkla kullanılan bu nanomalzemeler bitki hücre ve doku kültürlerinde de gelişmeyi teşvik edici sonuçlar ortaya çıkarmaktadırlar. Uygulanan biyo-AgNP konsantrasyonu ve uygulamanın yapıldığı bitki türü sonuçlarda farklılıklara sebep olsa da, pahalı sentetik büyüme düzenleyicilerine alternatif olarak biyo-AgNP'lerin bitki hücre ve doku kültürlerinde büyüme ve gelişmeyi teşvik edici olarak kullanımı mümkündür. Biyo-AgNP'lerin etkilerinin belirlenmesi için literatürde yeterli çalışma bulunmamaktadır. Çalışmamızın bitki biyoteknolojisi ve nanoteknolojiyi bağdaştırarak ortaya koyduğu sonuçlar bu konudaki eksiklerin giderilmesine katkıda bulunacak ve yeni çalışmaların öncülü olacaktır.

#### Teşekkür

Çalışmamız herhangi bir kurum ya da kuruluş tarafından desteklenmemiştir. Yazarlar bu makale için gerçek, potansiyel veya algılanan çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

#### Kaynakça

Amin, M., Anwar, F., Janjua, M. R. S. A., Iqbal, M. A., & Rashid U. (2012). Green synthesis of silver nanoparticles through reduction with *Solanum xanthocarpum* L. berry extract:

- Characterization, antimicrobial and urease inhibitory activities against *Helicobacter pylori*. *International Journal of Molecular Science*, 13(8), 9923 - 9941. doi:10.3390/ijms13089923
- Begum, S., Zahid, A., Khan, T., Khan, N.Z. & Ali, W. (2020). Comparative analysis of the effects of chemically and biologically synthesized silver nanoparticles on biomass accumulation and secondary metabolism in callus cultures of *Fagonia indica*. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(8), 1739–1750. doi:10.1007/s12298-020-00851-w
- Cuong, D. M., Du, P. C., Tung, H. T., Ngan, T. H. M., Luan, V. Q., Phong, T. H., ... & Nhu, D. T. (2021). Silver nanoparticles as an effective stimulant in micropropagation of *Panax vietnamensis*—a valuable medicinal plant. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 146, 577–588. doi:10.1007/s11240-021-02095-2
- Dhoondia, Z. H., & Chakraborty, H. (2012). *Lactobacillus* mediated synthesis of silver oxide nanoparticles. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 2012;2, 15. doi:10.5772/55741
- Huong, B. T. T., Xuan, T. D., Trung, K. H., Ha, T. T. T., Duong, V. X., Khanh, T. D., & Gioi, D. H. (2021). Influences of silver nanoparticles *in vitro* morphogenesis of speciality king banana (*Musa ssp.*) in Vietnam. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 22(33-34), 163-175.
- Jograna, M. B., Patil, D. S., & Kotwal, S. W. (2020) *Digitalis* species a potent herbal drug: A review on their pharmacognosy and pharmacological activities. *Journal of Current Pharmaceutical Research; Satara*, 10(4), 3821-3831.
- Jones, A. M. P., & Saxena, P. K. (2013). Inhibition of phenylpropanoid biosynthesis in *Artemisia annua* L.: A Novel approach to reduce oxidative browning in plant tissue culture. *Plos One*, 8(10), e76802. doi:10.1371/journal.pone.0076802
- Kumar, V., Singh, D. K., Mohan, S., Bano, D., Gundampati, R. K. & Hasan, S. H. (2017). Green synthesis of silver nanoparticle for the selective and sensitive colorimetric detection of mercury (II) ion. *Journal of Photochemistry & Photobiology B: Biology*, 168, 67–77. doi:10.1016/j.jphotobiol.2017.01.022
- Lloyd, G. B., & McCown, B. H. (1980). Commercial-feasible micropropagation of mountain laurel-*Kalmia latifolia* by use of shoot-tip culture. *Proceedings of International Plant Propagators Society*, 30, 421–427.
- Nartop, P. (2017). Biyosentetik gümüş nanopartiküllerinin *Pyracantha coccinea* bitkisinin gövde eksplantlarının yüzey sterilizasyonunda kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 759-761. doi:10.5505/pajes.2016.04809
- Nartop, P. (2018a). Chapter 9 - Engineering of biomass accumulation and secondary metabolite production in plant cell and tissue cultures. In P. Ahmad, M. A. Ahanger, V. P. Singh, D. K. Tripathi, P. Alam, M. N. Alyemeni (Eds.), *Plant Metabolites and Regulation Under Environmental Stress* (pp. 169-194). Amsterdam, Netherlands: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-812689-9.00009-1
- Nartop, P. (2018b). Effects of surface sterilization with green synthesized silver nanoparticles on *Lamiaceae* seeds. *IET Nanobiotechnology*, 12(5), 663–668. doi:10.1049/iet-nbt.2017.0195
- Nartop, P. (2018c). Green sterilization of *Rosmarinus officinalis* L. stem surfaces with silver nanoparticles synthesized using *Rubia tinctorum* L. cell culture extracts. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 42(2), 411-414. doi:10.1007/s40995-016-0065-0
- Nartop, P. (2019). Silver nanoparticles: Ecofriendly surface sterilization of plant seeds in different shapes and sizes. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 29(2), 453-460.
- Nartop, P., & Günbeldek, Z. (2020). Chapter 4. Impact of green synthesised silver nanoparticles on *In Vitro*-grown *Lavandula officinalis* plantlets. In A. Adler (Ed.), *Plant Science Research and Practices, The Lamiaceae Family, An Overview* (pp. 181-210). New York, USA: Nova Science Publishers. ISBN: 9781536170788.
- Nartop, P., Altan-Duman, A., & Titrek, A. (2021). Modelling of *in vitro* biomass production of *Digitalis purpurea* under the effects of biosynthetic silver nanoparticles. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science*, 45, 775-783. doi:10.1007/s40995-021-01105-4

- Nartop, P., Çetin, B. N., & Zaidan, G. (2023). Dose-dependent effects of bio-AgNPs on *Rubia tinctorum* callus and root biomass. *Iranian Journal of Science*, 47, 337-345. doi:10.1007/s40995-023-01425-7
- Patil, J. G., Ahire, M. L., Nitnaware, K. M., Panda, S., Bhatt, V. P., Kishor, P. B. K., & Nikam, T. D. (2013). *In vitro* propagation and production of cardiogenic glycosides in shoot cultures of *D.purpurea* L. by elicitation and precursor feeding. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(6), 2379–239. doi:10.1007/s00253-012-4489-y
- Perez-Alonso, N., Martin, R., Capote, A., Perez, A., Hernandez-Diaz, E. K., Rojas, L., ... & Chong-Perez, B. (2018). Efficient direct shoot organogenesis, genetic stability and secondary metabolite production of micropropagated *Digitalis purpurea* L. *Industrial Crops and Production*, 116, 259-266. doi:10.1016/j.indcrop.2018.02.067
- Qian, H., Peng, X., Han, X., Ren, J., Sun, L., & Fu, Z. (2013). Comparison of the toxicity of silver nanoparticles and silver ions on the growth of terrestrial plant model *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Environmental Sciences*, 25(9), 1947–1955. doi:10.1016/S1001-0742(12)60301-5
- Sinha, S. N., & Paul, D. (2014). Eco-friendly green synthesis and spectrophotometric characterization of silver nanoparticles synthesized using some common Indian spices. *International Journal of Green Herbal Chemistry*, 3(2), 401-408.
- Sintubin, L., Verstraete, W., & Boon, N. (2012). Biologically produced nanosilver: current state and future perspectives. *Biotechnology and Bioengineering*, 109(10), 2422–2436. doi:10.1002/bit.24570
- Tran, Q. H., Nguyen, V. Q., & Le, A-T. (2013). Silver nanoparticles: Synthesis, properties, toxicology, applications and perspectives. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 4, 033001. doi:10.1088/2043-6262/4/3/033001
- Yasin, S., Liu, L., & Yao, J. (2013). Biosynthesis of silver nanoparticles by bamboo leaves extract and their antimicrobial activity. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 6(1), 77–84. doi:10.3993/jfbi03201307





Research Article

**Characterization of Polymeric Wastes in the Hygienic Product Factory and Energy Recovery from These Wastes**

**Hatice KELEŞ<sup>1</sup>, Yunus ÖNAL<sup>\*2</sup>, Yeliz AKBULUT<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Eruslu Global Group of Companies, 4th Industrial Zone, 83424 Street, No: 3-5, Şehitkamil, 27630, Gaziantep, Türkiye

<sup>2</sup>Inonu University, Engineering Faculty, Chemical Engineering Department, 44280, Malatya, Türkiye  
Hatice KELEŞ, ORCID No: 0000-0002-6762-3929, Yunus ÖNAL, ORCID No: 0000-0001-6342-6816, Yeliz AKBULUT, ORCID No: 0000-0002-0703-7055

\*Corresponding author e-mail: yunus.onal@inonu.edu.tr

**Article Info**

Received: 15.09.2022  
Accepted: 27.02.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1174707

**Keywords**

FT-IR,  
Polymer characterization,  
TGA-DTA,  
Waste polymer

**Abstract:** In this study, the characterization of polymeric wastes released during production in Eruslu Global group companies and the re-evaluability of these wastes were studied. For this purpose, all polymeric wastes that occur in the production of sanitary napkins, diapers, packaging film and printed packaging film, which are the basic production products of the enterprise; It was determined that it consists of polypropylene, polyethylene (LDPE, MDPE, HDPE), polystyrene, polyethylene terephthalate polymers. Considering that all wastes are not polluted, it has been evaluated that they can be reused to a large extent. In the study conducted for this purpose, it was determined that 20 different waste products emerged depending on the product variety produced in the enterprise. Thermal analysis for each waste was characterized by calorific value, FTIR, XRD, SEM and TG-DSC (TGA-DTA) techniques. It was determined that paint was added to polymeric wastes in general. In addition, it has been determined that natural micronized calcite is added to some waste in terms of environmental impact and cost reduction. This article evaluates the crystallinity, structure and surface morphology of polymeric wastes produced during production in Eruslu Global group companies. For this purpose, all polymeric waste products formed in the production of sanitary napkin, diapers, packaging film and printed packaging film, which are the primary production products of the enterprise, were characterized. 20 different waste products produced in the enterprise were selected for evaluation. Waste is rich in polystyrene, polypropylene, polyethylene (LDPE, MDPE, HDPE) and polyethylene terephthalate polymers. Each waste was characterized by FTIR, XRD, SEM, thermal analysis and calorific value techniques. As a result of the study, dye additive was detected in the structure of these wastes. When the XRD results were evaluated, it was determined that micronized calcite was added to the polymers to prevent environmental pollution caused by the paint additive. In this way, environmental pollution and production costs are reduced. Calorific values of all samples are in the range of 4292 - 10965 cal/g.

**Hijyenik Ürün Fabrikasında Oluşan Polimerik Atıkların Karakterizasyonu ve Bu Atıklardan Enerji Geri Kazanımı**

**Makale Bilgileri**

Geliş: 15.09.2022  
Kabul: 27.02.2023  
Online Ağustos 2023

**Öz:** Bu çalışmada Eruslu Global grup şirketlerinde üretim sırasında açığa çıkan polimerik atıkların karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve bu atıkların yeniden değerlendirilebilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla işletmenin temel üretim ürünlerinden kadın pedi, çocuk bezi, ambalaj filmi ve baskılı ambalaj filmi üretiminde meydana gelen tüm polimerik atıkların; polipropilen, polietilen



DOI:10.53433/yyufbed.1174707

**Anahtar Kelimeler**

Atık polimer,  
FT-IR,  
Polimer karakterizasyon,  
TGA-DTA

(LDPE, MDPE, HDPE), polistiren, polietilen tereftalat polimerlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Tüm atıkların kirlenmediği göz önüne alındığında büyük oranda yeniden kullanılabilmesi değerlendirilmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmada işletmede üretilen ürün çeşitliliğine bağlı olarak 20 farklı atık ürün ortaya çıktığı belirlenmiştir. Her bir atık için termal analiz, ısıl değer, FTIR, XRD ve SEM teknikleri ile karakterize edilmiştir. Polimerik atıklara genel olarak boya katıldığı belirlenmiştir. Ayrıca çevresel etki açısından ve maliyet düşürücü olarak bazı atıklarda doğal mikronize kalsit katıldığı belirlenmiştir. Bu makalede, Eruslu Global grup şirketlerinde üretim sırasında oluşan polimerik atıkların kristallliği, yapısı ve yüzey morfolojisi değerlendirilmektedir. Bu amaçla işletmenin birincil üretim ürünleri olan hijyenik kadın pedi, çocuk bezi, ambalaj filmi ve baskılı ambalaj filmi üretiminde oluşan tüm polimerik atık ürünler karakterize edilmiştir. İşletmede üretilen 20 farklı atık ürün değerlendirilmek üzere seçilmiştir. Atık, polistiren, polipropilen, polietilen (LDPE, MDPE, HDPE) ve polietilen tereftalat polimerleri açısından zengindir. Her bir atık, FTIR, XRD, SEM, termal analiz ve ısıl değer teknikleri ile karakterize edilmiştir. Çalışma sonucunda bu atıkların yapısında boyar madde katkısı tespit edildi. XRD sonuçları değerlendirildiğinde, boya katkı maddesinin neden olduğu çevre kirliliğini önlemek için polimerlere mikronize kalsit ilave edildiği belirlendi. Bu sayede çevre kirliliği ve üretim maliyetleri azaltılmaktadır. Tüm numunelerin kalorifik değerleri 4292 - 10965 cal/g aralığındadır.

**1. Introduction**

Polymeric products are widely used in all areas of human life, especially in housing, food, medicine, and chemistry (Guyot & Bartholin, 1982). The amounts and compositions of polymer wastes have increased day by day as technology has advanced. Today, important industrial chemical processes such as OXO, Fischer-Tropsch, and Sasol use polymeric wastes as raw materials. The most important advantage of this use will be to include polymeric wastes in the global carbon cycle. Türkiye has a solid waste plastics rate of 5-14%. These plastics are classified as thermoplastics and thermosets (Tayyar & Üstün, 2010; Hejna et al., 2020; Durga et al., 2021; Phakedi et al., 2021; Srinivasan et al., 2021; Yuan et al., 2021). Thermoplastics include Polystyrene (PS), Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), Polyvinyl Chloride (PVC), and Polyethylene Terephthalate (PET). These widely used thermoplastics can be re-evaluated using chemical recycling energy recovery, and mechanical recycling methods (Paci & La Mantia, 1999; Khadzhiev et al., 2016; Costa et al., 2019; Pan et al., 2021; Siwal et al., 2021). There are four different approaches for recyclable polymeric/plastic waste. These approaches are primary recycling, secondary recycling, tertiary recycling, and quaternary recycling (Ignatyev et al., 2014; Francis, 2016; Singh et al., 2017; Zhuang et al., 2022). Primary recycling is carried out by adding waste to the fresh raw material at a certain rate during production. Secondary recycling is the use of waste by mixing it with other polymers. This method, also referred to as "mechanical recycling," includes physical processes such as separation, grinding, melting, and reshaping. Waste polymer can be reprocessed by melt extrusion. In tertiary recycling, wastes are broken down (solvolysis) in the presence of various solvents by chemical reactions, and thus the obtained raw products can be reused in production (Kumar, 2021). It is also called chemical recycling. Decomposition can also be achieved by thermal decomposition (pyrolysis) in an oxygen-free environment. In the last method, which is expressed as "quaternary recycling" or "energy recovery," the energy content of the wastes is recovered by burning (da Silva & Wiebeck, 2020). Pyrolysis (controlled combustion in a nitrogen atmosphere) is one of the chemical recycle techniques. This technique is frequently used to produce valuable chemicals with high yields. With the pyrolysis technique, the excess amount of waste, waste disposal, and environmental pollution that pose a problem are eliminated. Thus, renewables, eco-innovation and fossil resource use in the traditional plastics industry are improved (Picuno et al., 2020). The efficiency of solids, liquids and gases, which are products of the pyrolysis technique, can be increased. There are studies that increase the product yield depending on the type of polymer and the catalyst used (Padhan & Gupta, 2018). One article studied the recycling of PET bottles and PE bags, which are major plastic pollutants. The obtained results were shared in the literature (Rajasekaran & Maji, 2018). In another article, a new composite

material was produced using polyethylene terephthalate bottle waste and marble dust. The thermal and mechanical properties of the newly manufactured composite material were investigated (Çinar & Kar, 2018). In another article, chemical recycling of LDPE, HDPE and PP was investigated using two different methods (Achilias et al., 2008). In another article, the recycling of polymers by mechanical and chemical methods was investigated (Ragaert et al., 2017). In another paper, they investigated the usability of major thermoplastic polymers to obtain recyclable materials in a variety of industrial and indoor applications. The density, mechanical resistance, design and chemical properties of the produced materials have been improved. They worked on the recycling of thermoplastic polymers and the development of recycling technology (Grigore, 2017). Issues such as recycling of waste polymers, incineration technologies and energy generation have been extensively studied in the literature (Ramarad et al., 2015; Bahoria et al., 2018; Padhan & Gupta, 2018; Saleem et al., 2018). Recycling plastic and polymer wastes to make them reusable provides a significant economic gain. On the other hand, it will play an important role in the protection of natural resources. Many studies have been carried out in the literature for the recycling of waste polymers and the application of recycling methods (Baechler et al., 2013; Okan et al., 2019). In addition, there are many articles on the physical, structural and mechanical properties of recycling products (Hamad et al., 2013; Valerio et al., 2020). In the literature, there are many studies on the characterization of recycling products made from polyethylene, polypropylene, polystyrene and polyethylene terephthalate materials, which are widely used industrially (Achilias et al., 2007; Al-Salem et al., 2009; Ghosal & Nayak, 2022; Hamad et al., 2013; Suhaimi et al., 2022). This study evaluating Eruslu Health Group wastes was a pilot study that will shed light on the importance of waste management, characterization, recycling, and energy recovery. The aim of this article is to characterize Eruslu Group waste polymer products by calorific value, TGA-DTA, FTIR, XRD, and SEM methods and contribute to the literature on waste polymer characterization.

## 2. Material and Methods

Eruslu Global Group of Companies was established in 1996. This company produces in the chemical, textile, construction, packaging, and hygiene sectors. In 2004, it started to produce diapers under the Sleepy brand. It produces products such as adult patient diapers, sanitary napkins, wet towels, and napkins belonging to the Sleepy brand. In this study, 20 different polymer wastes from Sleepy were used as raw materials. The wastes were dried in an oven at 105°C. The dried wastes were characterized by calorific value, FT-IR, XRD, SEM and TGA-DTA methods.

### 2.1. Material

In this study, waste polymeric materials released as waste in Eruslu Global Company were used (Akdağ, 2019). Waste polymers were directly characterized without chemical pretreatment.

Abbreviations and polymer types of waste polymers are given in Table 1.

Table 1. Names, types and codes of waste polymers

Example	Polymer Type	Code
Exterior Cladding (Foam)	Polystyrene (PS)	1
Eco Raw Material Bag (Outside Aluminum)	Polyethylene (PE)	2
Green Cliche Tape	Polyethylene Terephthalate, Polyethylene (PET+PE)	3
Orange Cliche Tape	Polyethylene Terephthalate, Polyethylene (PET+PE)	4
Fiber Powder	Polyethylene Terephthalate (PET)	5
Sack Circle	Polypropylene (PP)	6
Waste Spunlace Fabric	Polyethylene Terephthalate (PET)	7
Bz Raw Material Bag	Polypropylene, Kraft paper (PP+Kraft paper)	8
C Band Wedge	Polyethylene, Polyethylene Terephthalate, Synthetic Rubber	9
Dirty Cloth	Polyethylene Terephthalate (PET)	10

Table 1. Names, types and codes of waste polymers (continued)

Example	Polymer Type	Code
Oily Cloth	Polyethylene Terephthalate (PET)	11
Green Adl Sample	Polyethylene Terephthalate (PET)	12
C Band Sample	Polyethylene, Polyethylene Terephthalate, Synthetic Rubber	13
Flexible Ear Sample	Polypropylene (PP)	14
White Adl Sample	Polyethylene Terephthalate (PET)	15
Tbs Sample	Polypropylene, Polyethylene Terephthalate, Synthetic Rubber	16
Mini Sideband Sample	Polypropylene, Synthetic Rubber	17
Sbs Sample	Polyethylene, Polyethylene Terephthalate, Synthetic Rubber	18
Barrier Sample	Polypropylene (PP)	19
Tissue Sample	Polypropylene (PP)	20

The wastes listed in Table 1 are shown in Figure 1, respectively.

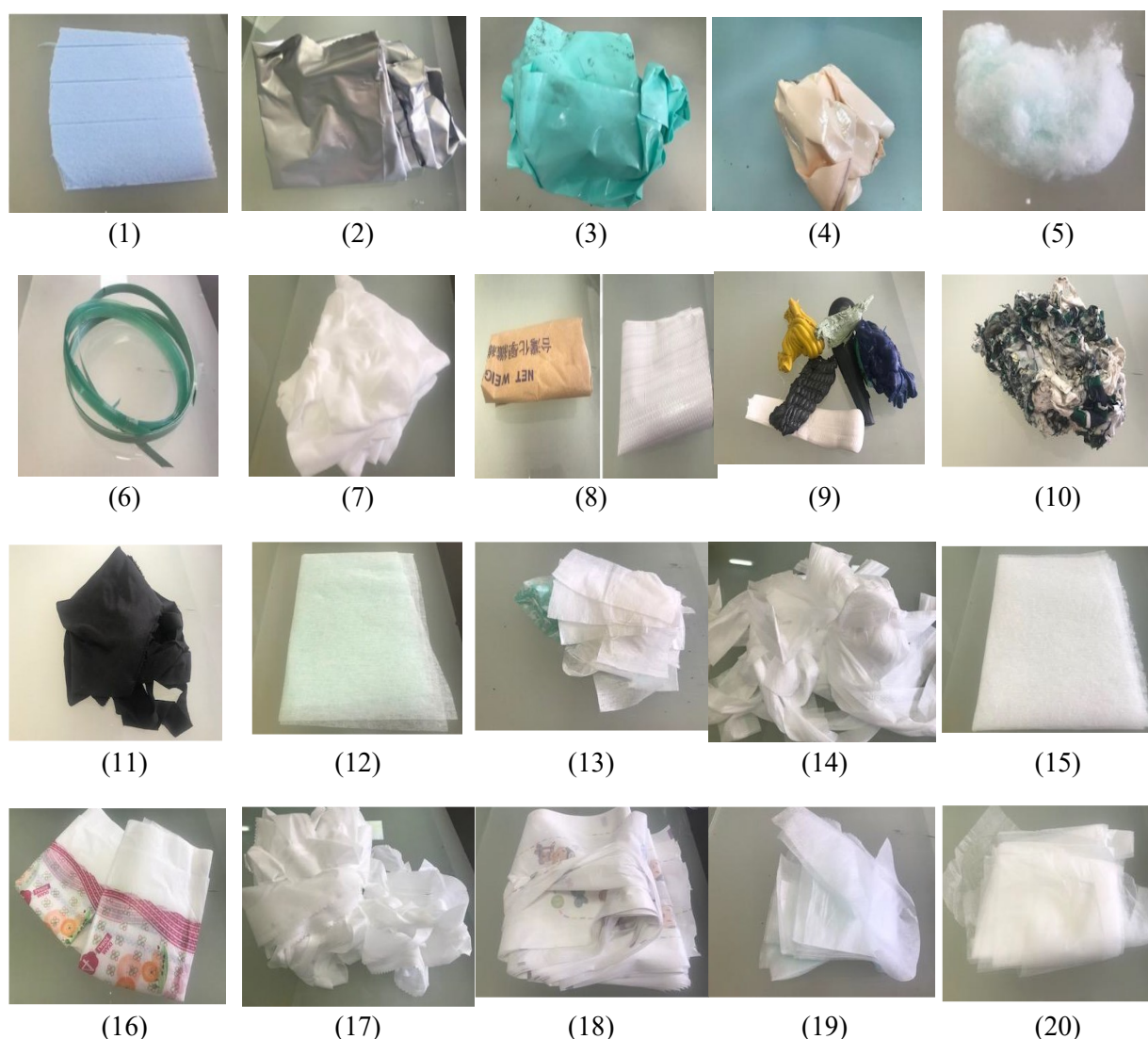


Figure 1. Images and codes of waste polymers.

## 2.2. Characterization of waste polymers

SEM analyzes were performed with the “LEO-EVO 40/Cambridge-England” brand device in the central research laboratory of Inonu University. Electron acceleration and generation mechanisms in the analyzes were carried out with the traditional method. XRD analyzes are Rigaku RadB-Dmax II

and Rigaku RINT-2000 X-ray diffractometers available at the Inonu University scientific research center (IBTAM). There is also a Jade 6 + crystal analysis program and library integrated into these systems. In the analysis, the electromagnetic beam of a certain wavelength was reflected by hitting the material surface and the reflected beam was interpreted according to Bragg's Law. FTIR analyses of the samples were performed with PerkinElmer Spectrum One device in the Central Research Laboratory of Inonu University in the range of 500–4000 cm<sup>-1</sup>. Thermal analyzes were made with Shimadzu brand TA 50 model and DTA 50 model thermal analyzers. The calorific value analysis was made with the PARR 1341 Plain Jacket Calorimeter.

### 2.2.1. Calorific value analysis

Heating values of waste polymers were calculated with the following formula (Equation 1 and 2).

$$HHV = \frac{(\Delta t * W) - e * 2.3}{W} \quad (1)$$

$$LHV = 1.8 * HHV - 91.23 * H \quad (2)$$

where, HHV: Higher heating value (cal/g), LHV: Lower heating value (cal/g),  $\Delta t$  : Change of temperature ( $t_2 - t_1$ ) (°C),  $t_2$  : final temperature,  $t_1$  : initial temperature, W: mass of the sample used, E : length of wire and H is the hydrogen content of the sample.

0.5 grams of waste polymers were weighed for calorific value analysis. It is built into the calorimeter bomb in the cuvette. Wire was used as a burning apparatus. Combustion was carried out in the presence of 25 atm of oxygen. Then the upper and lower calorific values were calculated.



Figure 2. Image of Series 1341 plain jacket oxygen combustion calorimeters.

## 3. Results

### 3.1. FT-IR analysis results

FTIR spectra of polymer samples with waste PE structure are given in Figure 3. The FTIR spectra of the samples are similar according to the polymers they contain. For the added inorganic components, the peak area changes depending on the amount.

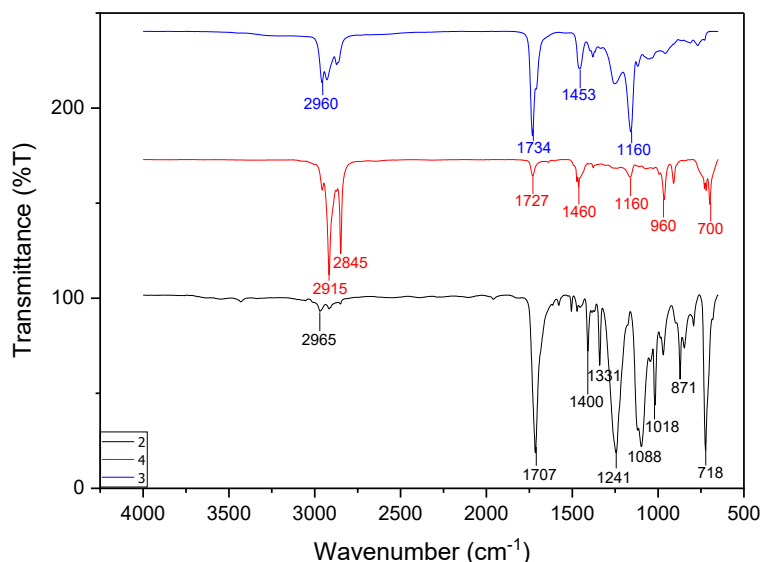


Figure 3. FTIR spectrum of wastes belonging to eco raw material bag, orange plate tape and green plate tape.

Table 2. FTIR spectrum and ash evaluation (Asgari et al., 2014)

Sample	Ash (%)	Peak (cm <sup>-1</sup> )	Group
Eco Raw Material Bag	16.33	2 900	Aliphatic C-H (Campbell et al., 2000)
Green Cliche Band	0.68	1 407, 871 and 718	Calcite and aragonite (Özsin et al., 2020)
Orange Cliche Band	6.45	2 900, 1 752	Aliphatic C-H, C=O (El-Saftawy et al., 2014)

The change in the peak intensities according to the polymer inorganic additive ratios is clearly seen.

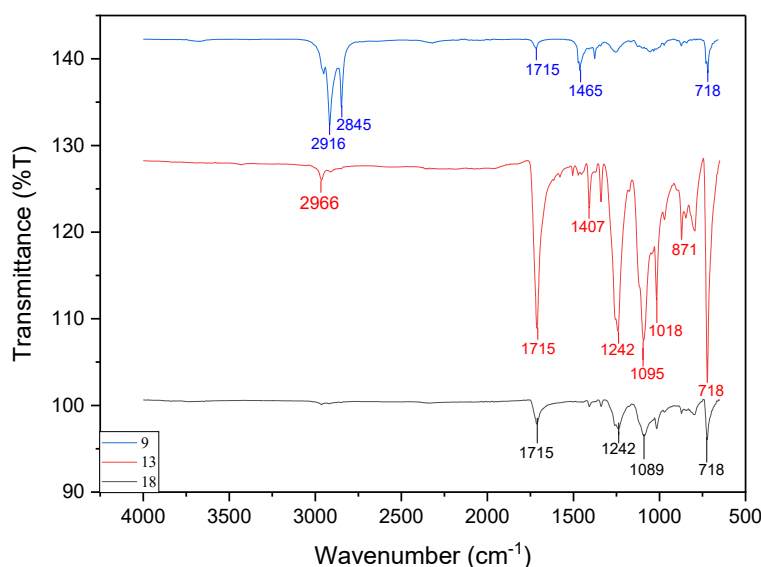


Figure 4. FTIR spectrum of wastes from C Band wedge, C band sample and SBS sample.



Table 3. FTIR spectrum and ash evaluation (Kaur et al., 2023)

Sample	Ash (%)	Peak (cm <sup>-1</sup> )	Group
C-Band wedge	0.74	2 916, 1 715	Aliphatic C-H, C=O (Campbell et al., 2000)
C-band sample	0.25	1 407, 871 and 718	Calcite (Özsin & Pütün, 2018)
SBS Sample	1.61	1 715	C=O (Achilias et al., 2007)

The PE ratio of the C-Band wedge is high. The mixture of rubber and PE prevented PET bands from appearing prominently in the FTIR spectrum. The low PET ratio was also effective in this. SBS Sample mainly contains synthetic rubber. In addition, it contains low percentage of PET and PE. Since the PE ratio is low, the aliphatic C-H stretch is in the form of a very weak peak. The calcite contribution in this waste is lower than the others.

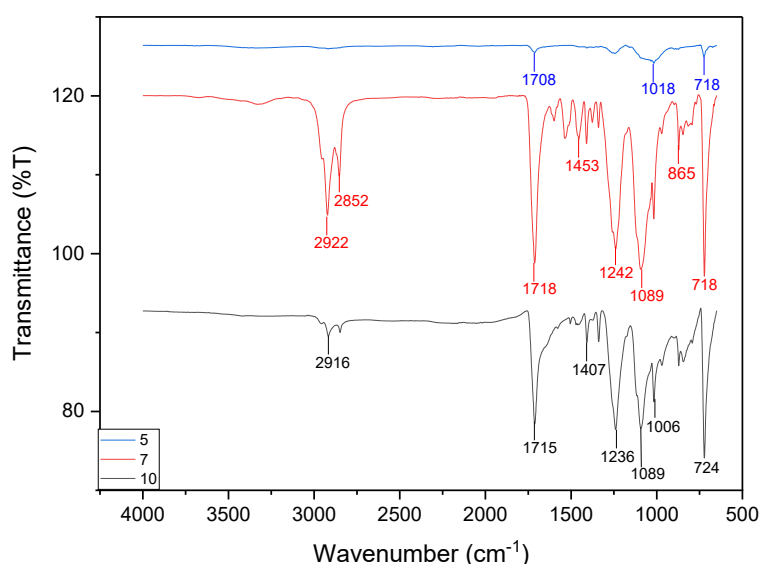


Figure 5. FTIR spectrum of fiber dust, waste spunlace fabric and soiled cloth.

Table 4. FTIR spectrum and ash evaluation (Tonetto et al., 2013)

Sample	Ash (%)	Peak (cm <sup>-1</sup> )	Group
Fiber Powder	0.74	1 708, 1 018	C=O (Gulmine et al., 2002)
Waste Spunlace Fabric	0.62	2 922, 2 852, 1 718, 1 453, 1 242, 1 089	Aliphatic and Aromatic C-H, C=O (Caro & Comas, 2017)
Dirty Cloth	2.54	2 916, 1 715, 1 407, 1 236, 1 089, 1 006	C=O, Calcite (Barrios et al., 2012)

Figure 5 calcite, 718 cm<sup>-1</sup> peak of pure PET fiber powder is weakly visible. Waste Spunlace fabric is a typical FTIR spectrum of PET. The broad band of 3 089 - 3 533 cm<sup>-1</sup> in the spectrum of the waste spunlace fabric belongs to the -OH stretch in water absorbed by PET. The peak around 1 242 cm<sup>-1</sup> belongs to the vibration of the ester group. 1 453, 824 and 718 cm<sup>-1</sup> peaks indicate that the sample in question contains calcite. Dirty cloth is in PET structure and belongs to the vibration of 1 715 cm<sup>-1</sup>,



aliphatic and aromatic C-H stresses in its structure. The 1 713  $\text{cm}^{-1}$  peak belongs to the  $\text{-C=O}$  (carbonyl) stretch specific to the carboxyl groups. Dirty cloth is used in the factory environment for cleaning daily machines and the environment.

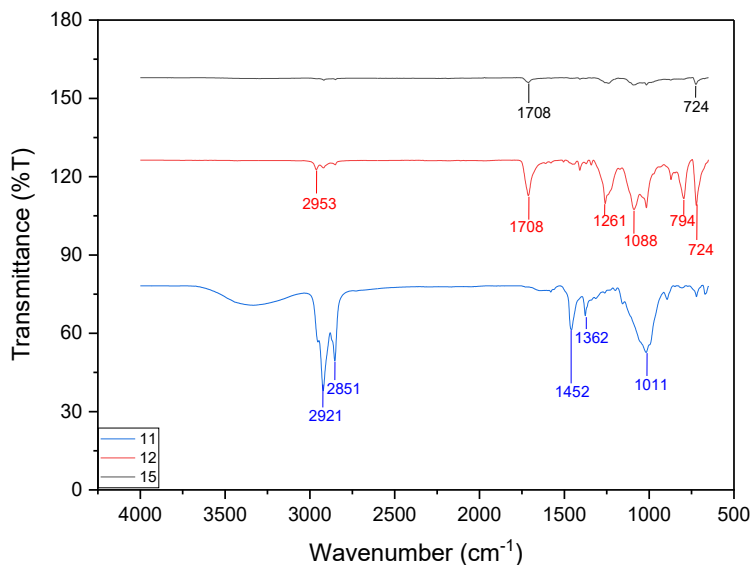


Figure 6. FTIR spectrum of oily cloth, green adl sample and white adl sample.

When Figure 6 is examined, the peaks of the oily cloth sample are quite weak. Although the green adl sample and the white adl sample have the same content, the spectra differ. The green adl sample contains dye. The white adl sample is in pure PET structure. The broad band 3 089-3 533  $\text{cm}^{-1}$  in the white adl sample belongs to the  $\text{-OH}$  stretch of water. This band shows that the PET sample binds water with hydrogen bond.

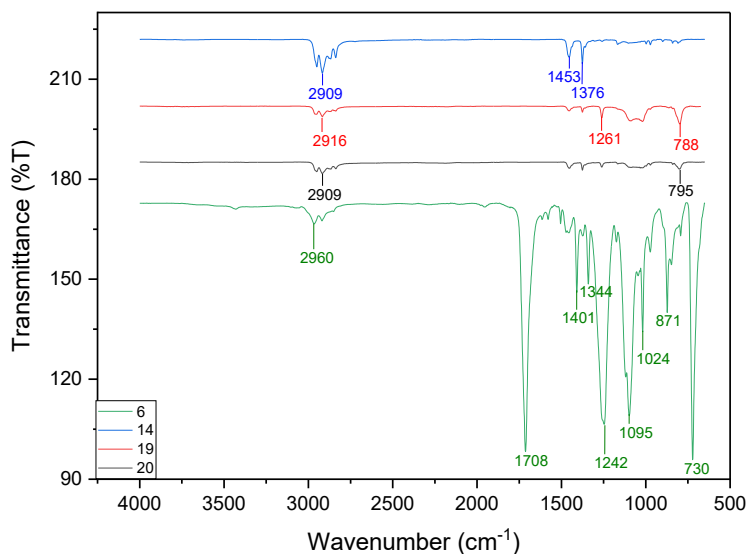


Figure 7. FTIR spectrum of sack circle, flexible flap, barrier sample and tissue sample.

Table 5. FTIR spectrum and ash evaluation (Riaz & Ashraf, 2014)

Sample	Ash (%)	Peak ( $\text{cm}^{-1}$ )	Group
Sack Circle	0.05	1 708	$\text{C=O}$ (Chalmers & Everall, 1999)

When Figure 7 is examined, peaks of aliphatic C-H stretching are seen in the Sack Circle. The Flexible Ear material made of polypropylene is the flexible parts on the sides of the diaper, the barrier sample serves to prevent the liquid from coming out on the sides, the tissue sample is the material that gives a soft feeling to the skin in the diaper. This part is the part that receives the liquid and transmits it to a substrate.

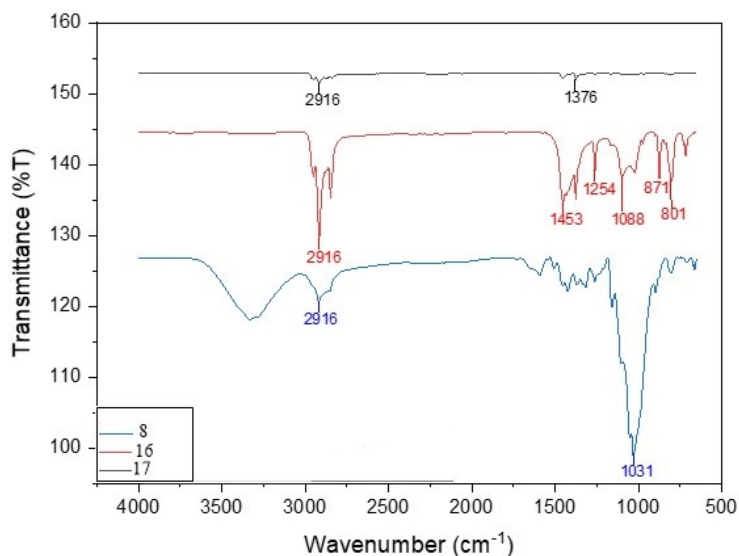


Figure 8. PP and other waste polymer FTIR graph.

Table 6. FTIR spectrum and ash evaluation (Kaur et al., 2023)

Sample	Ash (%)	Peak (cm <sup>-1</sup> )	Group
BZ Raw Material Bag	9.31	2 916, 1 031	Aliphatic C-H (Verdurmen-Noel et al., 2001)
TBS Sample	11.66	2 916, 1 453, 1 254	Aliphatic C-H (Fang et al., 2012)
Mini Sideband Sample	0.29	2 916, 1 376	Aliphatic C-H (Arutchelvi et al., 2008)

BZ Raw Material Bag Sample (PP-Kraft Paper) material is made of thick cardboard (Kraft) paper inner part is made of PP material. The peak with a peak minimum of 3 200 cm<sup>-1</sup> belongs to the –OH stretch of water in cellulosic structure and hydrogen bonded. The 2 916 cm<sup>-1</sup> peak belongs to the aliphatic C-H stretch in both cellulosic and PP structures. TBS Sample is a mixture of PP, PE and synthetic rubber. The aliphatic C-H stretch is seen as a sharp peak depending on all three materials in aliphatic structure. M-O peak around 1 000 cm<sup>-1</sup> of the additive material calcite is clearly visible. The Mini Sideband sample contains only PP and synthetic rubber, and the aliphatic C-H stretch is clearly visible.

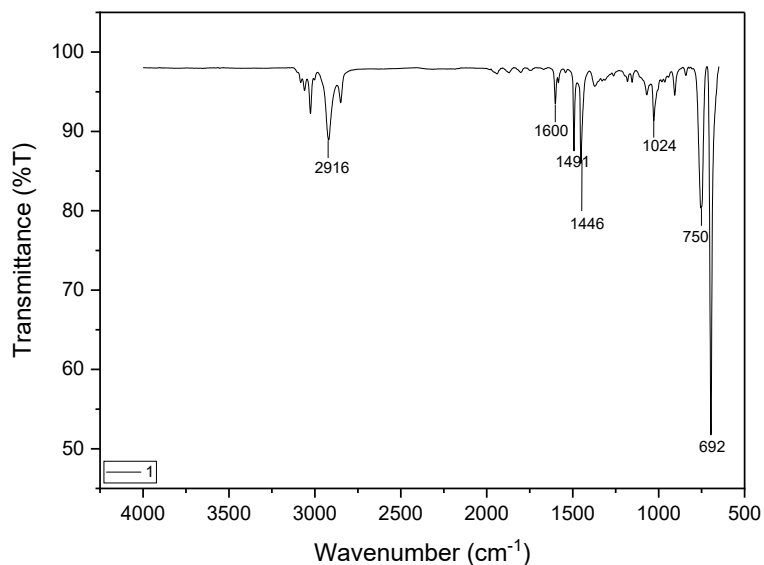


Figure 9. Facade ladding foam sample (PS) FTIR spectrum.

Exterior Cladding Foam Sample is polystyrene and is consistent with the literature. The peak around  $3000\text{ cm}^{-1}$  belongs to the aromatic C-H stretch (Campbell et al., 2000).

### 3.2. XRD analysis results

The XRD spectra of all waste polymer samples are given below. Since the additives such as inorganic calcite added to the polymeric material show a crystal structure, both the amorphous structure and the crystal structure of the additive are clearly seen in the XRD analysis.

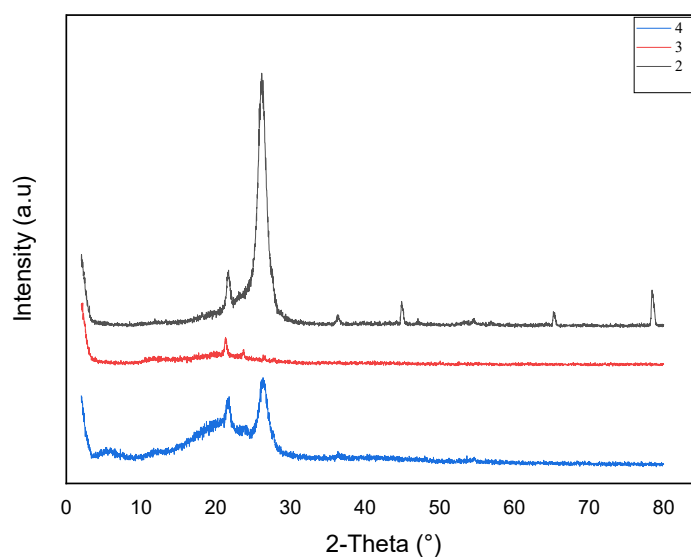


Figure 10. XRD graph of waste polymer in PE and PET+PE structure.

When the XRD spectrum of the Eco raw material sample made of PE is examined, the inner part is PE structure. The exterior is aluminum coated. The amorphous structure of PE is clearly visible. A crystalline structure peak is observed around  $20$  and  $27$   $2\theta$  depending on the aluminum on the outside. A semi-crystalline peak is observed around  $22$  and approximately  $27$   $2\theta$  of the orange cliché band (Tsai et al., 2015).

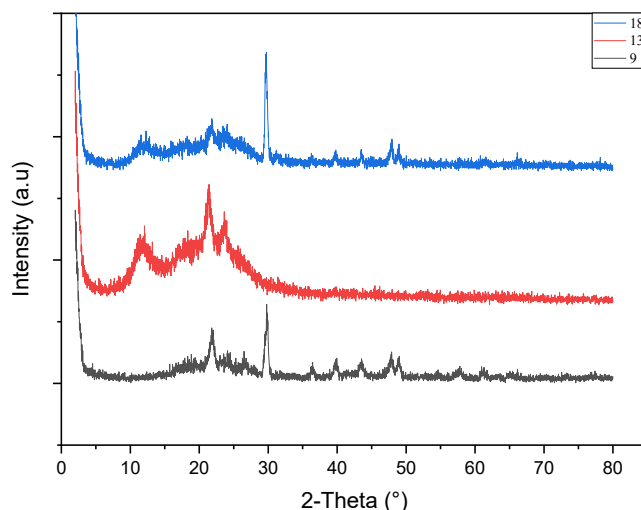


Figure 11. XRD graphic of waste polymer in PE+PET+Synthetic Rubber structure.

Both amorphous and crystalline structures are seen around 10 and 22  $2\theta$  of the C-band sample made of PET. The amorphous structure of the C-band wedge sample made of PET around 30  $2\theta$  is clearly visible. It is proved that it contains calcite with  $d=3.036 \text{ \AA}$  (Khanam & AlMaadeed, 2015).

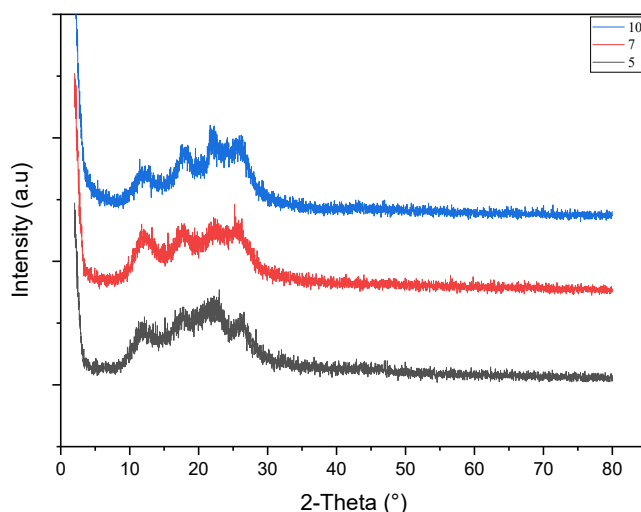


Figure 12. XRD graph of waste polymer in PET structure.

There are 3 peaks in amorphous structure around 20  $2\theta$  belonging to the dirty cloth (PET) sample. When the XRD of the waste spunlace sample made of PET is examined, it shows structural similarity with wet wipes. The inorganic additive content is very low (ash 0.62%). There are two amorphous structures around 20  $2\theta$ . There is a small crystalline peak of calcite. When the XRD spectrum of the fiber powder sample made of PET is examined, the PET in fiber structure is amorphous. Due to its linear structure, there are four amorphous peaks that are wide and have a maximum of around 20  $2\theta$  (Bian et al., 2022).

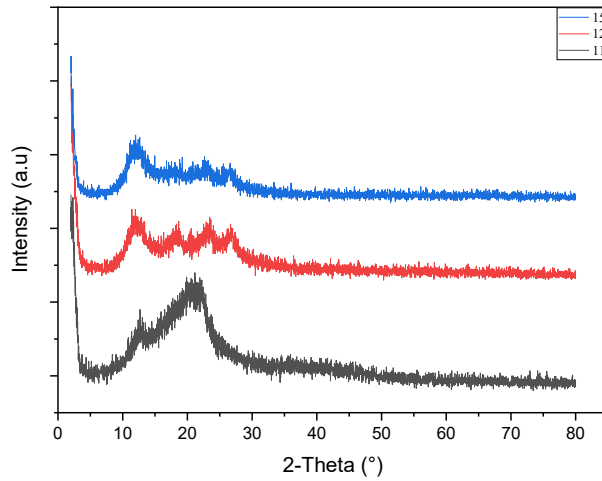


Figure 13. XRD graph of waste polymer in PET structure.

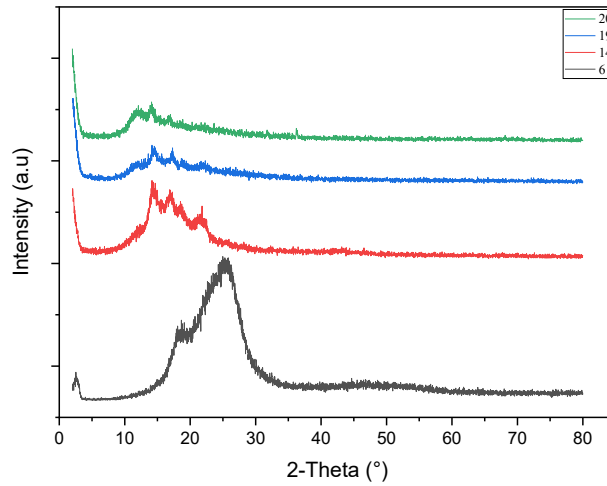


Figure 14. XRD graph of waste polymer in PP structure.

There are 4 different amorphous regions of the flexible flap sample made of PP. In the XRD spectrum of the sack circle sample made of PP, there is a large amorphous structure at 27 2θ (Michell & Müller, 2016).

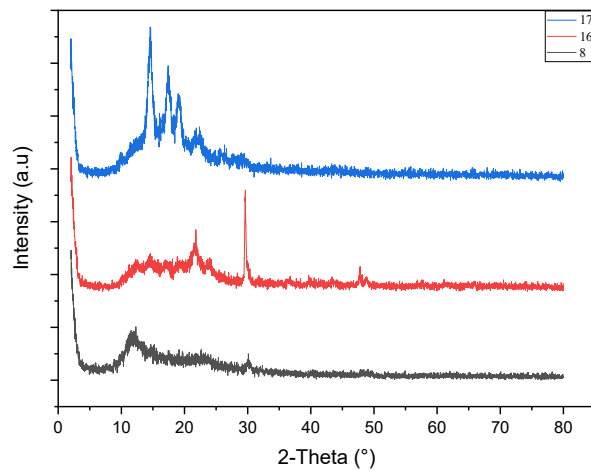


Figure 15. XRD graph of waste polymer in PP structure.

Crystalline peak is seen at 30  $2\theta$  of TBS sample (PP+PET+Synthetic Rubber). There is also a calcite peak as an additive in the structure (Sharma et al., 2011).

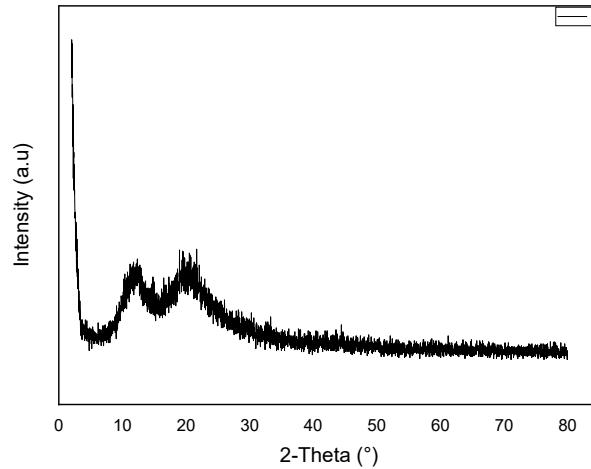


Figure 16. XRD graph of waste polymer in PS structure.

In the XRD spectrum of EPS (expanding polystyrene) foam used in exterior cladding, the structure is largely amorphous. There are two separate amorphous structures in 12 and 22  $2\theta$  (Woo et al., 2001).

### 3.3. SEM analysis results

The results of SEM analysis performed to determine the structural properties of waste polymers and other materials are given below. In Figure 17, the siding foam sample is called expandable (PS, EPS) made of polystyrene. SEM images are in harmony with the literature and have a honeycomb appearance. Since the sample is waste, it is seen that the honeycomb structure is deformed. The thin-walled polystyrene structure between the honeycombs is evident.

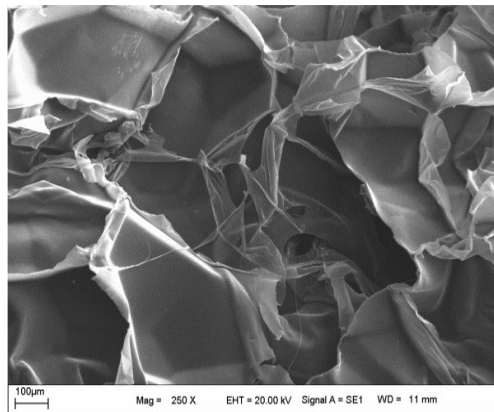


Figure 17. SEM photographs of the exterior coating foam sample (EPS).

SEM image of PE Eco raw material bag contains calcite. The ash value is 16.33%. Calcite particles are clearly visible in the SEM images and the grain size varies. However, it is seen that it is partially homogeneously distributed in PE.



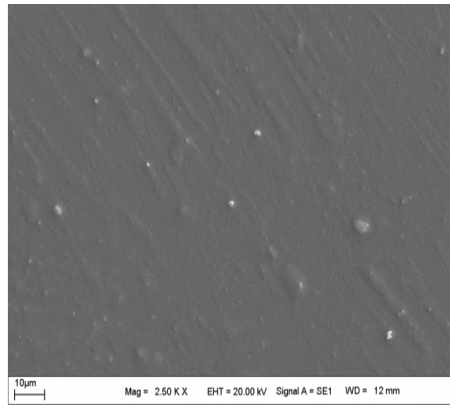


Figure 18. SEM photographs of PE eco raw material bag sample (PE outside aluminum inside).

Figure 19.a. and b. are SEM images of the green and orange cliché band samples, respectively. The only difference between the two samples is the color difference and the material is a PE+PET mixture. SEM images show that both polymers are structurally separated into separate phases. Although it is not a homogeneous mixture, there is a structural harmony. The polymers are adhered to each other.

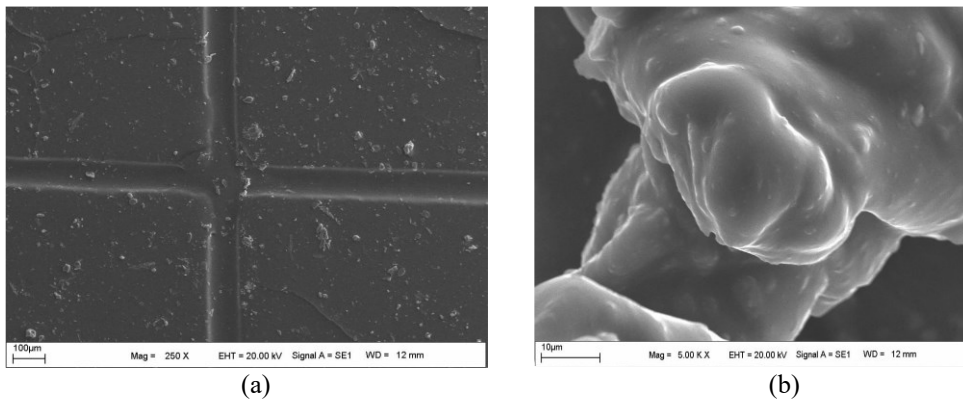


Figure 19. (a) Green plate tape sample (PE+PET) SEM images, (b) Orange plate tape sample (PE+PET) SEM images.

Figure 20 is the SEM image of the powder sample obtained from PET fiber. PET fibers are clearly visible from the SEM image. The fiber thicknesses are not homogeneous and have different diameters. However, as a result of milling, the fiber structure is not divided into very small pieces. It is seen that there are random breaks at the breaking points of the fiber particles.

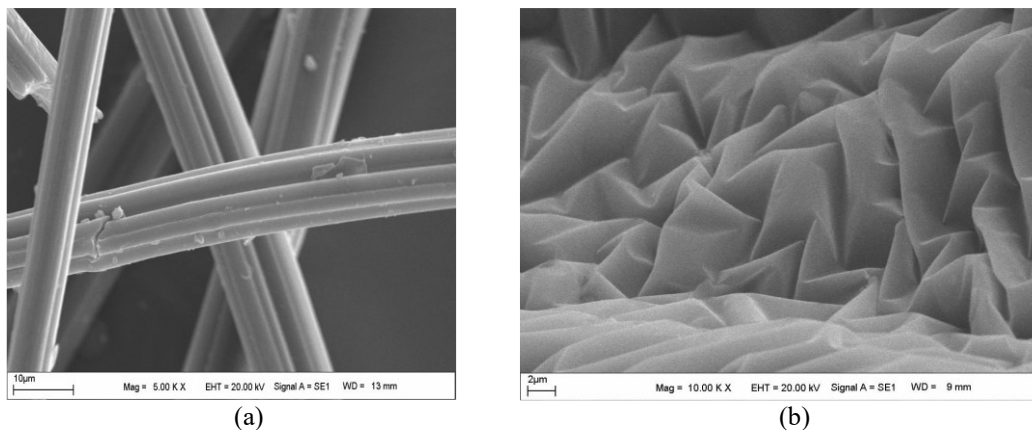


Figure 20. Fiber powder sample (PET) SEM images.

In Figure 21.a. the PP sack circle sample is shown and it does not contain additives (ash value 0.05%). Structurally, there is a very homogeneous structure present. Contaminations observed on the surface are the ones that have subsequently spread to the structure. In Figure 21.b. SEM image of PET waste spunlace sample is shown. The material has a fiber structure and the diameters of the fibers are very homogeneous, i.e. there is no breakage in the fibers.

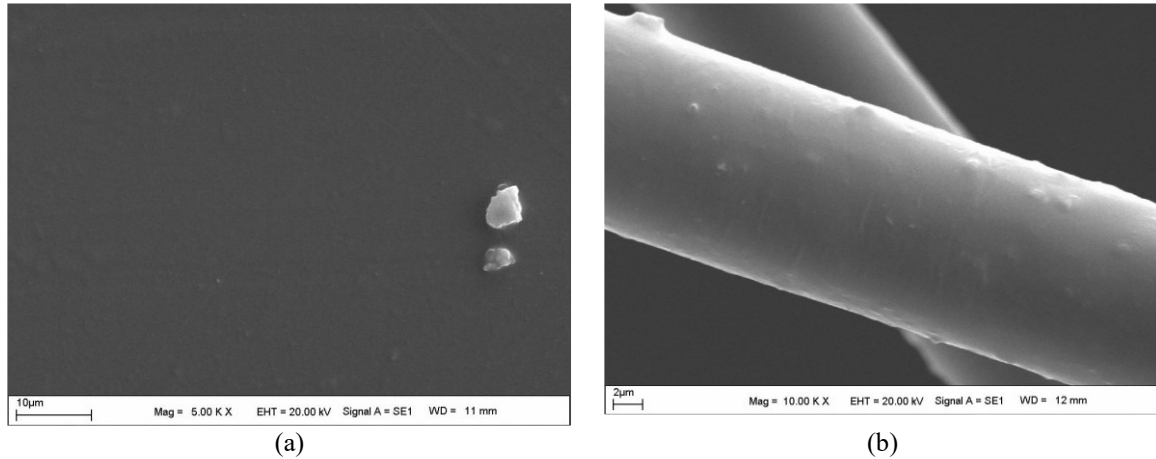


Figure 21. (a) Sack circle sample (PP) SEM images, (b) Waste spunlace sample (PET) SEM images.

Figure 22.a. It is the SEM image of the packaging in which more polluting substances found in many industries, especially in cement, is shown. The outer part is paper and the inner part is mostly made of PP material. While the paper (cardboard) part has a puffy appearance with a partial air gap, the inner coating of the PP polymer has a thin layered structure. There is no adhesion-like interaction between the paper and the polymer. In Figure 22.b. This is the SEM image of the PET-containing material is shown. It remains solid while recycling the part of the diaper to which the mini side tapes are attached to the front. Ash content is high (15.53%) and appears as a separate phase in the polymer and on the surface. The additive is inorganic and has a calcite structure.

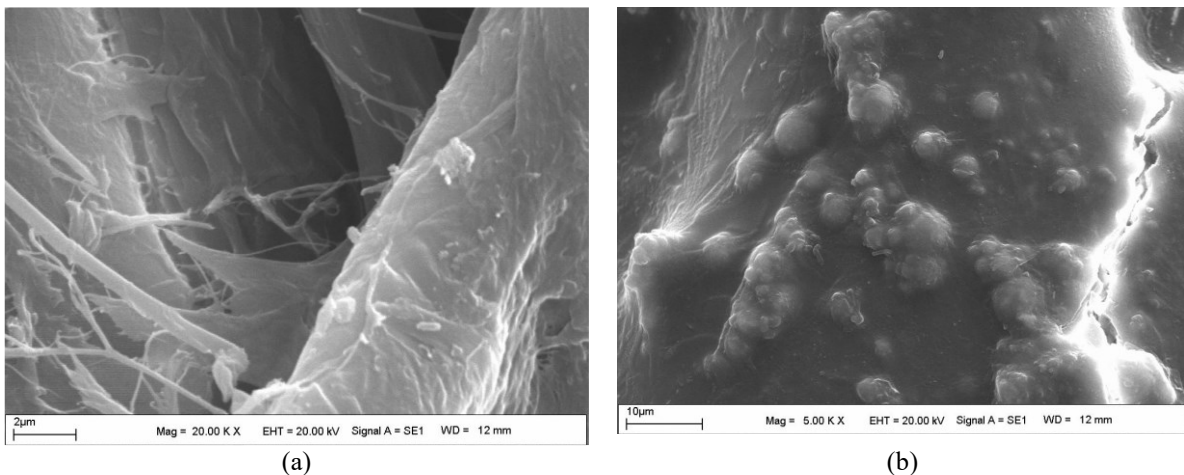


Figure 22. (a) BZ raw material bag sample (PP+Kraft Paper) SEM images, (b) C band wedge sample (PE+PET+Synthetic Rubber) SEM images.

The SEM image of the polymeric cloth used for cleaning is shown in Figure 23.a. The homogeneous fiber structure is clearly visible and the impurities attached to the fiber are also clearly visible. Inorganic structures resulting from pollutants collected from the environment caused an ash value of 2.54%. As seen from Figure 23.b, SEM image of the cloth used to clean oily impurities and homogeneous polymeric fibers are clearly visible. It is clearly seen that they have structural integrity as a result of the adhesion of the oil to the fiber surface.

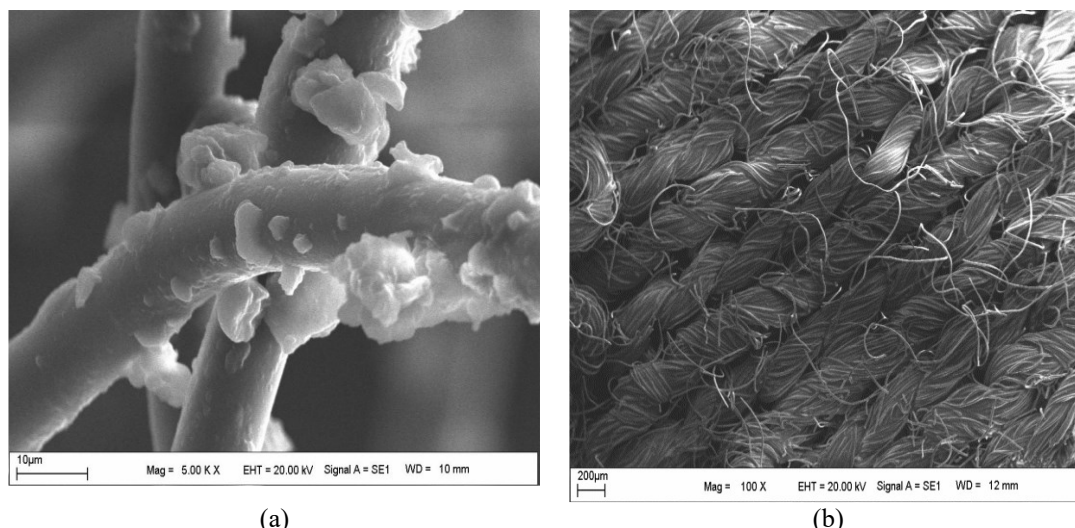


Figure 23. (a) Dirty cloth sample (PET) SEM images, (b) Oil cloth sample (PET) SEM images.

The sample shown in Figure 24.a is the SEM image of the layer in the diaper that absorbs and diffuses the liquid. The material is in fiber structure and it is seen that the fiber is in the form of a hollow tube. With the help of these channels, the liquid is absorbed and transferred to the other part. The fiber diameter is homogeneous. Figure 24.b. shows the SEM image of the front part of the diaper on which the mini side bands are attached. There is a formation in the form of channels in the fiber structure to ensure adhesion to the surface.

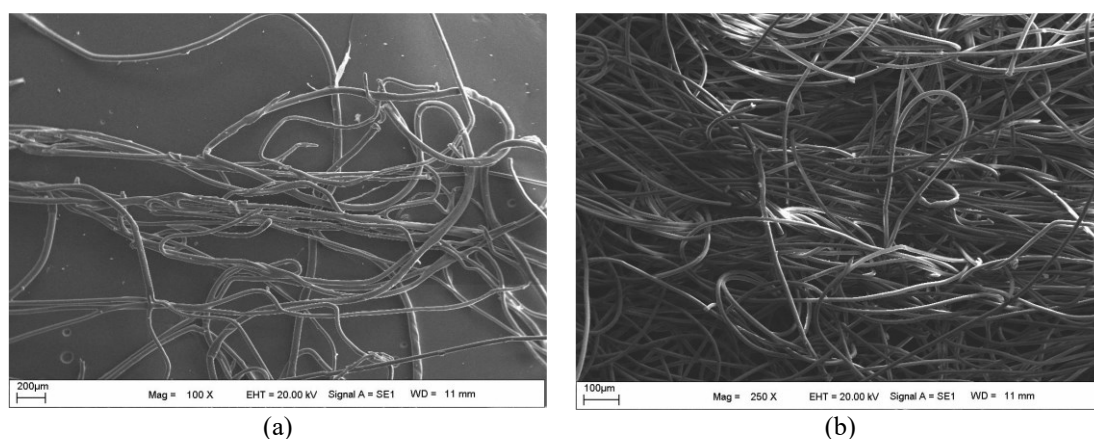


Figure 24. (a) Green adl sample (PET) SEM images, (b) C band sample (PE+PET+Synthetic Rubber) SEM images.

There are flexible parts on the sides of the diaper and it is a material made of PP (Figure 25.a). It is produced in the form of filaments of different diameters to increase flexibility throughout the material and prevent breakage. Figure 25.b. shows the part that absorbs and spreads the liquid in the baby diaper made of PET and consists of fibers that have been converted into cotton. Since PET fiber surfaces are thinned too much, water is retained by hydrogen bonding at the carbonyl groups and polymer end ends on the surface and the liquid is absorbed.

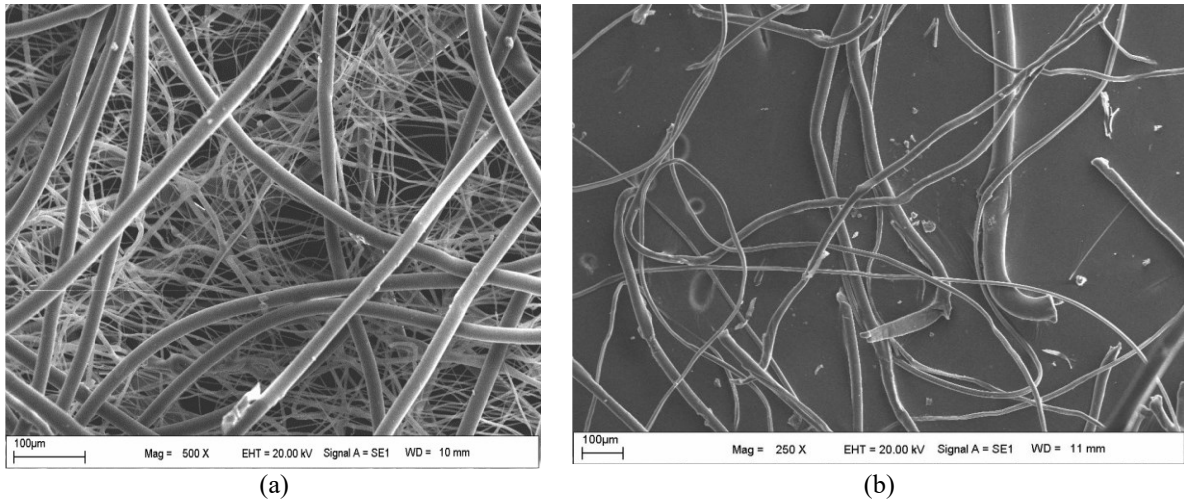


Figure 25. (a) Flexible atria sample (PP) SEM images, (b) White adl sample (PET) SEM images.

Figure 26.a. the diaper made of PE-PP contains the SEM image of the outermost layer. PE and PP have been transformed into a very thin filament form to increase flexibility and to allow the skin to breathe. Figure 26.b. SEM image of mini sideband sample made of PP. The material is a very flexible material and is in filament form. The SEM image shows that the fibers are homogeneous and intertwined. This structure contributes to its flexibility.

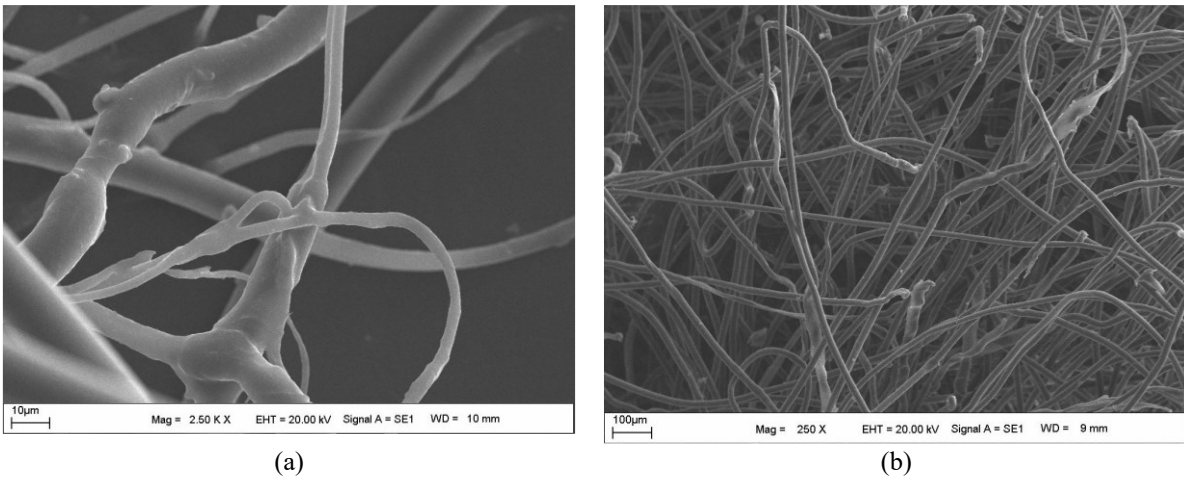


Figure 26. (a) TBS sample (PE+PP+Synthetic Rubber) SEM images, (b) Mini sideband sample (PP+Synthetic Rubber) SEM images.

Figure 27.a. SEM image of outermost layer of diaper made of PE and PET. From the SEM images, it is seen that both polymers are in fiber structure. While PE provides flexibility to the material, PET creates a barrier to prevent the liquid inside from escaping. It is clearly seen that the fibers are of very homogeneous diameter. Figure 27.b. It is the SEM image of the part that prevents the liquid from coming out on the side parts made of PP. Thin fibers were formed in order to provide impermeability by interpenetrating each other in different diameters by stripping the PP surfaces. Since PP does not hydrogen bond with water, this structure provides an extra contribution.

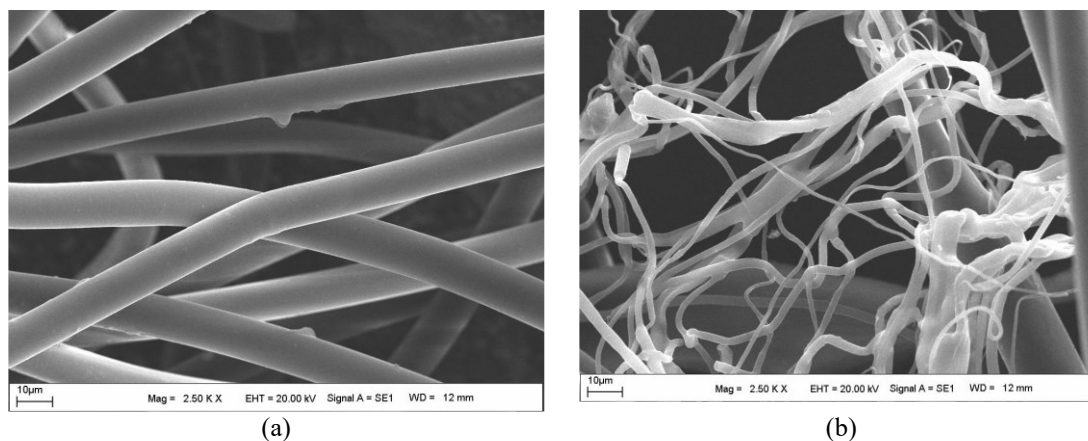


Figure 27. (a) SBS sample (PE+PET+Synthetic Rubber) SEM images, (b) Barrier sample (PP) SEM images.

Figure 28 it contains the SEM image of the part that receives the liquid made of PP and transmits it to a substrate. Although the SEM image is similar to the previous structure, this structure has the appearance of a partially sieve structure. Since PP does not like water, the sieve structure is designed to allow the liquid to pass down to the part that holds the liquid.

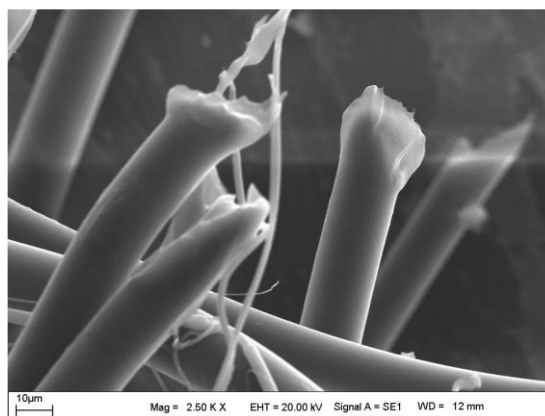


Figure 28. Tissue sample (PP) SEM images.

### 3.4. TGA-DTA analysis results

Figures 29-37 are DSC-TG spectra of some of the samples studied, respectively. Figure 29 is a green ADL (PET) material with exothermic peak maximums at 245, 360, 450 and 560°C. The ash value was low (0.07%) and the TG value was close to zero. Depending on the ethylene and terephthalic acid groups in the PET structure and the chain structure of the polymer, exothermic decomposition peaks at different temperatures are the expected result (Ng et al., 2002).

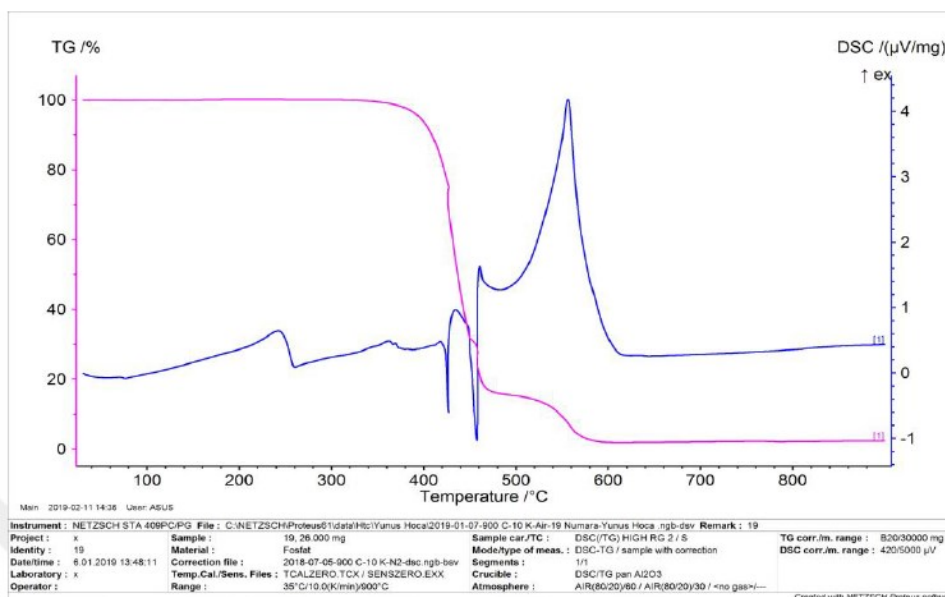


Figure 29. Green ADL sample (12) (PET) thermal analysis chart.

Figure 30 is the DSC-TG thermal decomposition spectrum of the PE+PET+Synthetic Rubber mixture material, and the endothermic peak at 125°C indicates the removal of water, and the exothermic peaks at 240, 420, 440, 480 and 540°C belong to the thermal decomposition of all three polymers. The ash value of the material is 0.25% and the TG value is close to zero (Prime et al., 2009).

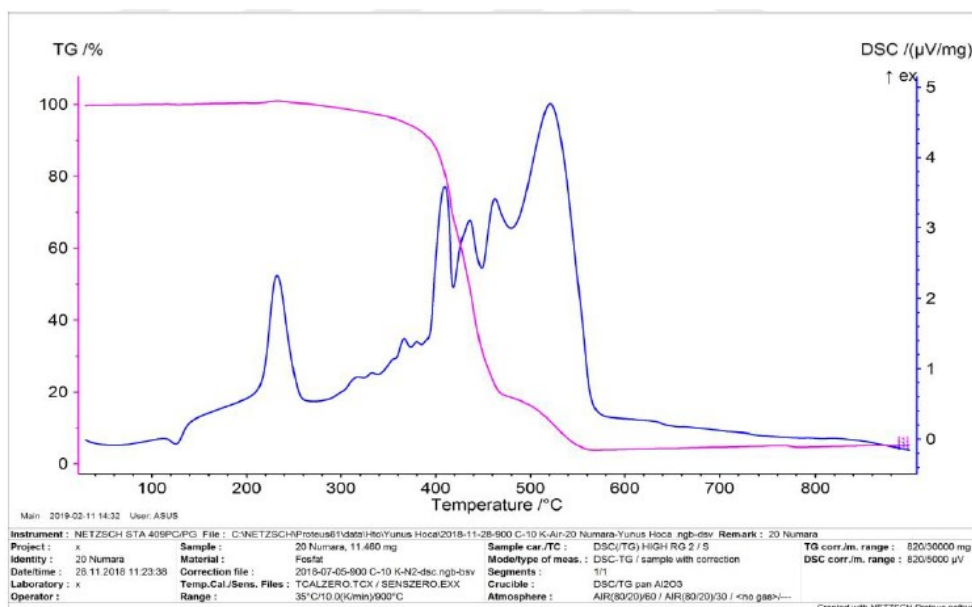


Figure 30. C-Tape sample (13) (PE+PET+Synthetic Rubber) thermal analysis chart.

Figure 31 is the DSC-TG spectrum of the flexible tab material made of PP. The endothermic peak at 160°C belongs to the melting of PP, and the 360, 400 and 460°C exothermic peaks are the thermal degradation peaks of PP (Doyle, 1961). The ash value is zero and the TG value is close to zero.



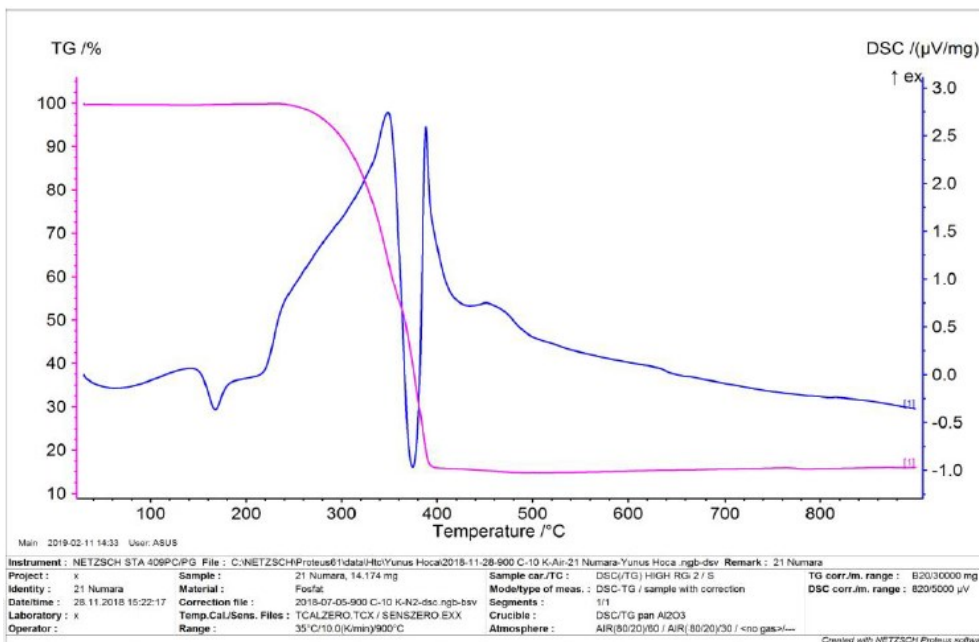


Figure 31. Flexible ear sample (14) (PP) thermal analysis chart.

Figure 32 is the DSC-TG spectrum of the white ADL material made of PET. An endothermic peak is observed at 260°C and an exothermic peak at 440 and 520°C.

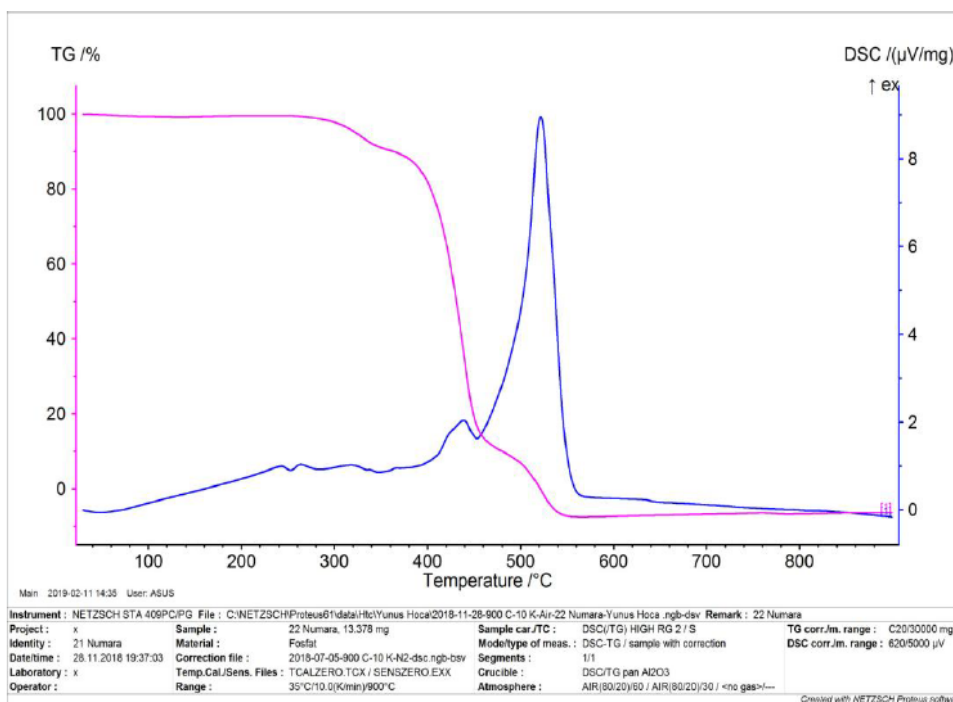


Figure 32. White ADL sample (15) (PET) thermal analysis chart.

Figure 33 DSC-TG thermal degradation spectrum of PP+PE+ Synthetic Rubber mixture material is given. Two endothermic peaks at temperatures of 170 and 240°C belong to the melting of polymeric materials. The exothermic peaks at 380 and 480°C are the degradation peaks of the polymer mixture. In addition, an endothermic peak of around 700°C is observed for the inorganic additive.

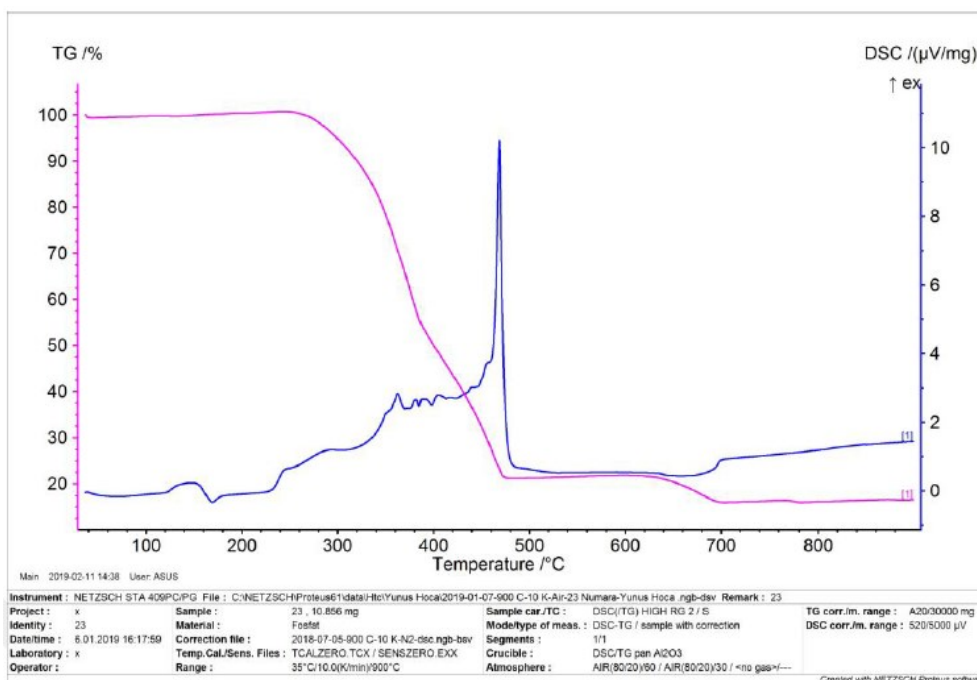


Figure 33. TBS sample (16) (PP+PE+ Synthetic Rubber) thermal analysis chart.

Figure 34 is the DSC-TG thermal degradation spectrum of the mini sideband material made of PP+Synthetic Rubber. The endothermic peak of the melting of PP at 180°C and the broadband exothermic peak with the peak maximum at 400°C belong to the thermal decomposition of PP.

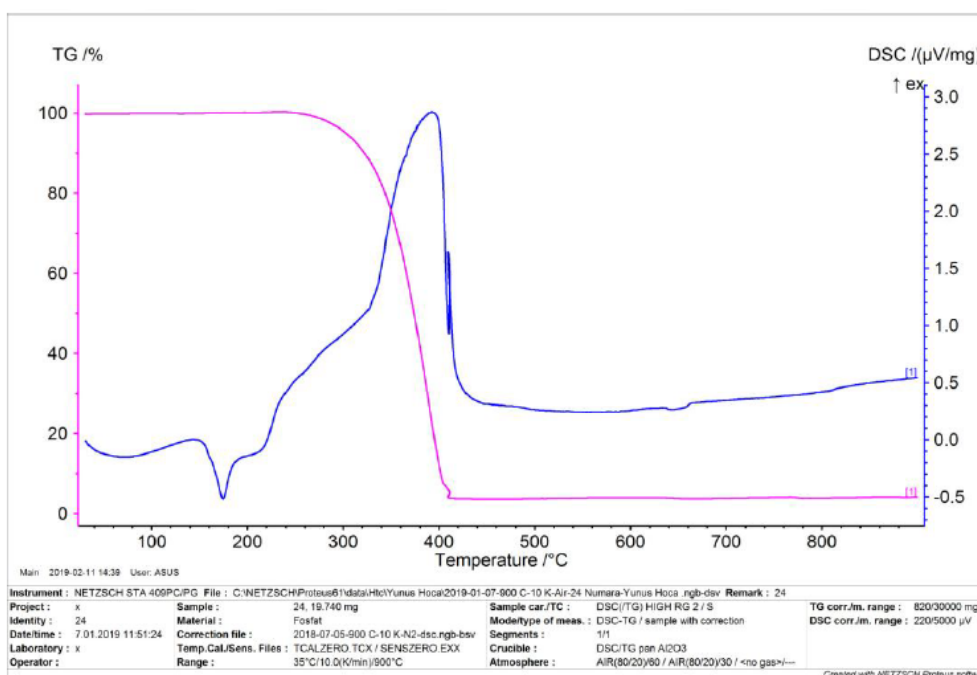


Figure 34. Mini sideband sample (17) (PP+Synthetic Rubber) thermal analysis chart.

Figure 35 is the DSC-TG thermal degradation spectrum of PE+PET+Synthetic Rubber mixture SBS material. The endothermic peak in the form of a broad band in the temperature range of 260-360°C belongs to the melting of the polymer mixture. Exothermic peaks at 400, 460 and 520°C are the degradation peaks of the polymeric mixture. The endothermic decomposition peak of the inorganic additive is clearly visible at 740°C (Doyle, 1961).

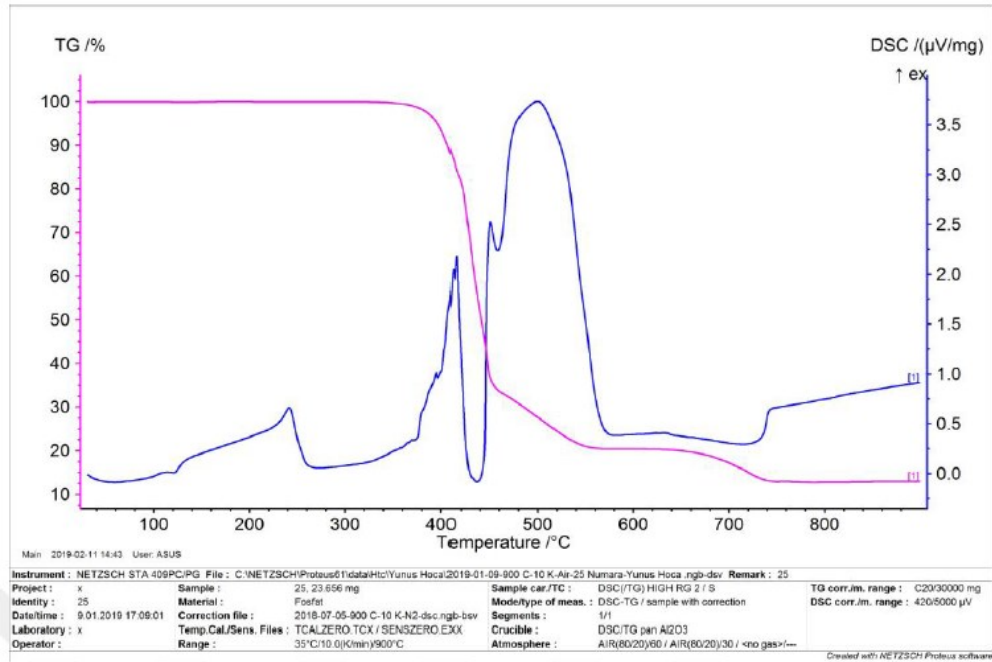


Figure 35. SBS sample (18) (PE+PET+ Synthetic Rubber) thermal analysis chart.

Figures 36 and 37 are DSC-TG thermal degradation spectra of barrier and tissue materials made of PP. The endothermic peak of both samples at 170°C belongs to the melting of PP, and the exothermic peak at 390°C belongs to the thermal degradation of PP (Yuan et al., 2021).

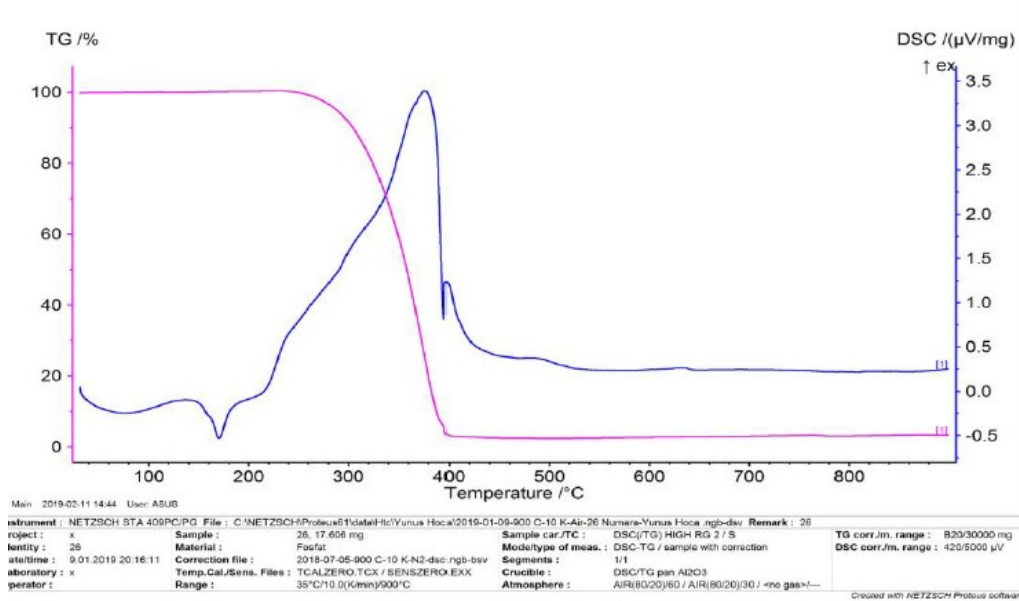


Figure 36. Barrier sample (19) (PP) thermal analysis chart.

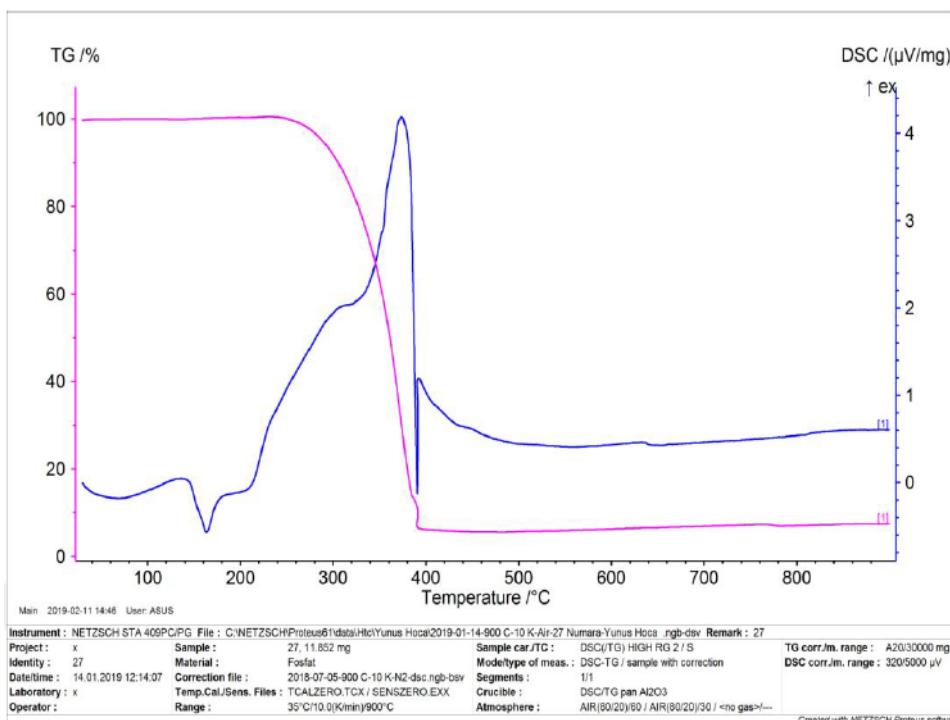


Figure 37. Tissue sample (20) (PP) thermal analysis chart.

### 3.5. Calorific value analysis results

The LHV and HHV values obtained as a result of the thermal value analysis are given in Table 7.

Table 7. Calorific value of polymeric waste

Sample	Lower heating value (LHV) (cal/g)	Higher heating value (HHV) (cal/g)	Sample	Lower heating value (LHV) (cal/g)	Higher heating value (HHV) (cal/g)
Exterior Cladding (Foam)	9 444	9 065	Oily Cloth	7 134	6 713
Eco Raw Material Bag (Outside Aluminum)	9 902	9 422	Green Adl Sample	4 655	4 462
Green Cliche Tape	8 836	8 317	C Band Sample	6 646	6 316
Orange Cliche Tape	8 451	7 973	Flexible Ear Sample	10 797	10 103
Fiber Powder	4 491	4 292	White Adl Sample	5 007	4 783
Sack Circle	5 543	5 334	Tbs Sample	8 921	8 344
Waste Spunlace Fabric	5 548	5 289	Mini Sideband Sample	10 578	9 941
Bz Raw Material Bag	6 585	6 156	Sbs Sample	5 396	5 207
C Band Wedge	7 008	6 648	Barrier Sample	10 965	10 305
Dirty Cloth	6 220	6 017	Tissue Sample	10 525	9 844

Calorific values of all samples are in the range of 4 292-10 965 cal/g values. When wastes are evaluated in terms of energy production, the amount of waste is very high. For this reason, waste recycling is at a level that can be achieved with incineration systems. When the thermal values are

examined, enough energy can be obtained from wastes to meet all the energy needs of the enterprise. In this study, thermal values of waste polymers are given. The total amount of energy is 18 790 MJ/hour (Akdağ, 2019) (This value has been calculated by evaluating all the wastes produced in the factory.)

#### 4. Discussion and Conclusion

The waste amounts for 2017, 2018 and 2019 at the factory are given in the table below by the month.

Table 8. The waste amounts for 2017, 2018, and 2019 years

2017		2018		2019	
Months	Waste amount (kg)	Months	Waste amount (kg)	Months	Waste amount (kg)
July	543 197	January	443 712	January	263 808
August	513 030	February	431 254	February	256 135
September	356 980	March	411 220	March	330 221
October	311 940	April	397 680	April	339 476
November	319 966	May	353 454	May	304 328
December	419 840	June	350 730	June	203 562
		July	400 760	July	319 194
		August	429 106	August	237 217
		September	268 168		
		October	357 317		
		November	260 255		
		December	270 166		

As can be seen from the table, the amount of waste is increasing every year. For this reason, the measured calorie values of the wastes, FT-IR, XRD, SEM, TGA-DTA graphics gave information about the pollution status of the wastes. As a result of the thermal value analysis, a total energy value of 18 790 MJ/hour emerges. When the Bz raw material bag materials in stock in the factory are burned regularly within 3 years, an energy value of 108 MJ/hour is obtained, and when the calculation is made for C band waste materials, an energy value of 1 586 MJ/hour. In total,  $18\,790 + 108 + 1\,586 = 20\,484$  MJ/hour energy can be obtained. This energy can be used to generate electricity. If it is used in electricity generation, 2,276 MWh of electricity production emerges. The production capacity of the factory continues to increase. It is thought that the amount of energy will remain constant even if the wastes in the stock are finished. Waste polymers from this factory are not suitable to be disposed of in the landfill. Waste should be stocked. And it should be used in electricity generation by direct combustion. In this way, it should be brought back to the economy. According to the characterization results, the basic compositions of the wastes did not change. The structure has been preserved. Polyethylene, polypropylene, polystyrene, and polyethylene terephthalate polymers in the structure of the sanitary napkins, diapers, patient diapers and by-products studied did not undergo any chemical change. In this case, these raw materials can be reused in different areas of the industry.

Studies in the literature evaluating polymer wastes are given in Table 9. Existing factory waste products can be used as a source of raw materials in the fields of textile, insulation, toys, automotive, health, bottles, as in these studies. When their structural properties are examined, it has been determined that polymer types are widely used in industry (Tayyar & Üstün, 2010; Çınar & Kar, 2018; Padhan & Gupta, 2018; Dieterich et al., 2020).

Table 9. Previous studies on the evaluation of polymeric wastes

Reclaimed polymer	Usage Areas	Reference
Polyethylene (PE)	Industrial uses and road applications, composite production, production of jerrycans, bottles, plates and toys	(Achilias et al., 2008; Duarte & Faxina, 2021)
Polypropylene (PP)	Insulation applications, yoghurt cups, suitcases, pipes, buckets	(Tayyar & Üstün, 2010; Tufan et al., 2015)
Polyethylene Terephthalate (PET)	It is used to make food and Beverage bottles and synthetic yarn., fiber and so on.	(Ahrabi et al., 2012; El-Saftawy et al., 2014; Sharma et al., 2011)
Polystyrene (PS)	Yogurt cups, foam packs, cassettes, thermal insulation material	(Demirkır et al., 2017; Özsin & Pütün, 2018; Woo et al., 2001)
Polyethylene (PE), Polyethylene Terephthalate (PET), acrylonitrile butadiene styrene	Bags, sacks, and wraps, other packaging, other containers, and soft drink, milk, and water containers, appliances, furniture, casings of lead-acid batteries, and other products.	(Al-Salem et al., 2009)
Polyethylene (PE), Polypropylene (PP)	Packaging film, bags, pipes	(Achilias et al., 2007)
Polyethylene terephthalate (PET)	Packaging, food, beverage and automotive industries	(Ghosal & Nayak, 2022; Raheem et al., 2019)

It is possible to obtain heat energy by incineration of wastes directly. Polymeric wastes can be used for energy recovery in the industry, and thus energy costs can be reduced. The results of the thermal analysis and calorific values of wastes showed that a significant part of the electricity need of the factory could be met. The recovery heat energy can be used to convert water to steam in steam boilers, to run electric generators, and to generate heating and hot water. In this way, energy savings will be achieved, and environmental pollution will be reduced by waste disposal by incineration.

### Acknowledgements

We would like to thank Inonu University Scientific Research Projects Unit for their support within the scope of the project numbered FYL-2018 1462. Author Yeliz Toptaş, within the scope of YÖK 100/2000 PhD Project, by the Council of Higher Education in the sub-field of Fuels (Fossil and Bio) and Combustion; It is supported by TUBITAK with 2211-C Domestic Priority Fields Doctoral Scholarship Program.

### References

- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A., & Antonakou, E. V. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 536 - 542. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.06.076
- Achilias, D. S., Antonakou, E., Roupakias, C., Megalokonomos, P., & Lappas, A. (2008). Recycling techniques of polyolefins from plastic wastes. *Global NEST Journal*, 10(1), 114 - 122.
- Ahrabi, A. Z., Bilici, I., & Bilgesü, A. Y. (2012). Pet atıkları kullanılarak kompozit malzeme üretiminin araştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(3), 467 - 471.
- Akdağ, H. (2019). *Eruslu global grup firmalarındaki atık polimerlerin karakterizasyonu ve piroliz-yakma yöntemleri kullanılarak enerji üretimi fizibilitesinin hazırlanması*. (M.Sc.) İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625 - 2643.



[doi:10.1016/j.wasman.2009.06.004](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004)

- Arutchelvi, J., Sudhakar, M., Arkatkar, A., Doble, M., Bhaduri, S., & Uppara, P. V. (2008). Biodegradation of polyethylene and polypropylene. *Indian Journal of Biotechnology*, 7(1), 9-22.
- Asgari, P., Moradi, O., & Tajeddin, B. (2014). The effect of nanocomposite packaging carbon nanotube base on organoleptic and fungal growth of Mazafati brand dates. *International Nano Letters*, 4, 1 - 5. [doi:10.1007/s40089-014-0098-3](https://doi.org/10.1007/s40089-014-0098-3)
- Baechler, C., DeVuono, M., & Pearce, J. M. (2013). Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock. *Rapid Prototyping Journal*, 19(2), 118 - 125. [doi:10.1108/13552541311302978](https://doi.org/10.1108/13552541311302978)
- Bahoria, B. V., Parbat, D. K., & Nagarnaik, P. B. (2018). XRD analysis of natural sand, quarry dust, waste plastic (ldpe) to be used as a fine aggregate in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1432 - 1438. [doi:10.1016/j.matpr.2017.11.230](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.230)
- Barrios, V. A. E., Méndez, J. R. R., Aguilar, N. V. P., Espinosa, G. A., & Rodríguez, J. L. D. (2012). FTIR-An Essential Characterization Technique for Polymeric Materials. In T. Theophanides (Ed.), *Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology* (pp. 195-212). InTech. [doi:10.5772/36044](https://doi.org/10.5772/36044)
- Bian, L., Dong, Y., & Jiang, B. (2022). Simplified creation of polyester fabric supported Fe-based MOFs by an industrialized dyeing process: Conditions optimization, photocatalytic activity and polyvinyl alcohol removal. *Journal of Environmental Sciences*, 116, 52 - 67. [doi:10.1016/j.jes.2021.06.007](https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.06.007)
- Campbell, D., Pethrick, R. A., & White, J. R. (2000). *Polymer Characterization: Physical Techniques*. London, UK: CRC press.
- Caro, E., & Comas, E. (2017). Polyethylene comonomer characterization by using FTIR and a multivariate classification technique. *Talanta*, 163, 48 - 53. [doi:10.1016/j.talanta.2016.10.082](https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.10.082)
- Chalmers, J. M., & Everall, N. J. (1999). Polymer analysis and characterization by FTIR, FTIR-microscopy, Raman spectroscopy and chemometrics. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 5(3), 223 - 245. [doi:10.1080/10236669908009739](https://doi.org/10.1080/10236669908009739)
- Çınar, M. E., & Kar, F. (2018). Characterization of composite produced from waste PET and marble dust. *Construction and Building Materials*, 163, 734 - 741. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.155](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.155)
- Costa, L. M. B., Silva, H. M. R. D., Peralta, J., & Oliveira, J. R. M. (2019). Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification—Performance and morphological assessment. *Construction and Building Materials*, 198, 237 - 244. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.279](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.279)
- da Silva, D. J., & Wiebeck, H. (2020). Current options for characterizing, sorting, and recycling polymeric waste. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 36(4), 284 - 303. [doi:10.1177/1477760620918603](https://doi.org/10.1177/1477760620918603)
- Demirkır, C., Öztürk, H., & Çolakoğlu, G. (2017). Effects of press parameters on some technological properties of polystyrene composite plywood. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 17(3), 517 - 522. [doi:10.17475/kastorman.285645](https://doi.org/10.17475/kastorman.285645)
- Dieterich, V., Buttler, A., Hanel, A., Spliethoff, H., & Fendt, S. (2020). Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer–Tropsch-fuels: a review. *Energy & Environmental Science*, 13(10), 3207 - 3252. [doi:10.1039/D0EE01187H](https://doi.org/10.1039/D0EE01187H)
- Doyle, C. D. (1961). Estimating thermal stability of experimental polymers by empirical thermogravimetric analysis. *Analytical Chemistry*, 33(1), 77 - 79. [doi:10.1021/ac60169a022](https://doi.org/10.1021/ac60169a022)
- Duarte, G. M., & Faxina, A. L. (2021). Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: A literature review. *Construction and Building Materials*, 312, 125408. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125408](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125408)
- Durga, G., Kalra, P., Verma, V. K., Wangdi, K., & Mishra, A. (2021). Ionic liquids: From a solvent for polymeric reactions to the monomers for poly (ionic liquids). *Journal of Molecular Liquids*, 335, 116540. [doi:10.1016/j.molliq.2021.116540](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116540)
- El-Saftawy, A. A., Elfalaky, A., Ragheb, M. S., & Zakhary, S. G. (2014). Electron beam induced surface modifications of PET film. *Radiation Physics and Chemistry*, 102, 96 - 102. [doi:10.1016/j.radphyschem.2014.04.025](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.04.025)

- Fang, J., Zhang, L., Sutton, D., Wang, X., & Lin, T. (2012). Needleless melt-electrospinning of polypropylene nanofibres. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 382639. doi:10.1155/2012/382639
- Francis, R. (2016). *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Ghosal, K., & Nayak, C. (2022). Recent advances in chemical recycling of polyethylene terephthalate waste into value added products for sustainable coating solutions—hope vs. hype. *Materials Advances*, 3(4), 1974 - 1992. doi:10.1039/D1MA01112J
- Grigore, M. E. (2017). Methods of recycling, properties and applications of recycled thermoplastic polymers. *Recycling*, 2(4), 24. doi:10.3390/recycling2040024
- Gulmine, J. V., Janissek, P. R., Heise, H. M., & Akcelrud, L. (2002). Polyethylene characterization by FTIR. *Polymer Testing*, 21(5), 557 - 563. doi:10.1016/S0142-9418(01)00124-6
- Guyot, A., & Bartholin, M. (1982). Design and properties of polymers as materials for fine chemistry. *Progress in Polymer Science*, 8(3), 277 - 331. doi:10.1016/0079-6700(82)90002-8
- Hamad, K., Kaseem, M., & Deri, F. (2013). Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), 2801 - 2812. doi:10.1016/j.polydegradstab.2013.09.025
- Hejna, A., Korol, J., Przybysz-Romatowska, M., Zedler, Ł., Chmielnicki, B., & Formela, K. (2020). Waste tire rubber as low-cost and environmentally-friendly modifier in thermoset polymers—A review. *Waste Management*, 108, 106 - 118. doi:10.1016/j.wasman.2020.04.032
- Ignatyev, I. A., Thielemans, W., & Vander Beke, B. (2014). Recycling of polymers: A review. *ChemSusChem*, 7(6), 1579–1593. doi:10.1002/cssc.201300898
- Kaur, B., Thakur, N., & Goswami, M. (2023). FTIR spectroscopy based identification and compatibility studies of Gamma Oryzanol with various polymers. *Materials Today: Proceedings*, in press. doi:10.1016/j.matpr.2023.01.164
- Khadzhiev, S. N., Kulikova, M. V., Ivantsov, M. I., Zemtsov, L. M., Karpacheva, G. P., Muratov, D. G., Bondarenko, G. N., & Oknina, N. V. (2016). Fischer–Tropsch synthesis in the presence of nanosized iron-polymer catalysts in a fixed-bed reactor. *Petroleum Chemistry*, 56(6), 522 - 528. doi:10.1134/S0965544116060049
- Khanam, P. N., & AlMaadeed, M. A. A. (2015). Processing and characterization of polyethylene-based composites. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 1(2), 63 - 79. doi:10.1179/2055035915Y.0000000002
- Kumar, R. (2021). Tertiary and quaternary recycling of thermoplastics by additive manufacturing approach for thermal sustainability. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2382 - 2386. doi:10.1016/j.matpr.2020.08.183
- Michell, R. M., & Müller, A. J. (2016). Confined crystallization of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*, 54, 183 - 213. doi:10.1016/j.progpolymsci.2015.10.007
- Ng, H. M., Saidi, N. M., Omar, F. S., Ramesh, K., Ramesh, S., & Bashir, S. (2018). Thermogravimetric Analysis of Polymers. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (Ed.) (pp. 1-29). Wiley Online Library. doi:10.1002/0471440264.pst667
- Okan, M., Aydin, H. M., & Barsbay, M. (2019). Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94(1), 8 - 21. doi:10.1002/jctb.5778
- Özsin, G., & Pütün, A. E. (2018). A comparative study on co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with polyethylene terephthalate, polystyrene, and polyvinyl chloride: Synergistic effects and product characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 205, 1127 - 1138. doi:10.1016/j.jclepro.2018.09.134
- Özsin, G., Kılıç, M., Apaydin-Varol, E., Pütün, A. E., & Pütün, E. (2020). A thermo-kinetic study on co-pyrolysis of oil shale and polyethylene terephthalate using TGA/FT-IR. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 37, 1888 - 1898. doi:10.1007/s11814-020-0614-2
- Paci, M., & La Mantia, F. P. (1999). Influence of small amounts of polyvinylchloride on the recycling of polyethyleneterephthalate. *Polymer Degradation and Stability*, 63(1), 11 - 14. doi:10.1016/S0141-3910(98)00053-6
- Padhan, R. K., & Gupta, A. A. (2018). Preparation and evaluation of waste PET derived polyurethane polymer modified bitumen through in situ polymerization reaction. *Construction and Building Materials*, 158, 337 - 345. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.147

- Pan, D., Su, F., Liu, H., Liu, C., Umar, A., Castañeda, L., ..., & Guo, Z. (2021). Research progress on catalytic pyrolysis and reuse of waste plastics and petroleum sludge. *ES Materials & Manufacturing*, 11(6), 3 - 15. doi:10.30919/esmm5f415
- Phakedi, D., Ude, A. U., & Oladijo, P. O. (2021). Co-pyrolysis of polymer waste and carbon-based matter as an alternative for waste management in the developing world. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155, 105077. doi:10.1016/j.jaap.2021.105077
- Picuno, C., Alassali, A., Sundermann, M., Godosi, Z., Picuno, P., & Kuchta, K. (2020). Decontamination and recycling of agrochemical plastic packaging waste. *Journal of Hazardous Materials*, 381, 120965. doi:10.1016/j.jhazmat.2019.120965
- Prime, R. B., Bair, H. E., Vyazovkin, S., Gallagher, P. K., & Riga, A. (2009). Thermogravimetric Analysis (TGA). In J. D. Menczel, & R. B. Prime (Eds.), *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*, (pp. 241-317). Hoboken, N.J, USA: John Wiley & Sons. doi:10.1002/9780470423837.ch3
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24 - 58. doi:10.1016/j.wasman.2017.07.044
- Raheem, A. B., Noor, Z. Z., Hassan, A., Abd Hamid, M. K., Samsudin, S. A., & Sabeen, A. H. (2019). Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 225, 1052 - 1064. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.019
- Rajasekaran, D., & Maji, P. K. (2018). Recycling of plastic wastes with poly (ethylene-co-methacrylic acid) copolymer as compatibilizer and their conversion into high-end product. *Waste Management*, 74, 135 - 143. doi:10.1016/j.wasman.2018.01.018
- Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C. T., Chuah, A. L., & Rashmi, W. (2015). Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. *Progress in Materials Science*, 72, 100 - 140. doi:10.1016/j.pmatsci.2015.02.004
- Riaz, U., & Ashraf, S. M. (2014). Characterization of Polymer Blends with FTIR Spectroscopy. In S. Thomas, Y. Grohens, & P. Jyotishkumar (Eds.), *Characterization of Polymer Blends*, (pp. 625-678). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH. doi:10.1002/9783527645602.ch20
- Saleem, J., Riaz, M. A., & Gordon, M. (2018). Oil sorbents from plastic wastes and polymers: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 341, 424 - 437. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.07.072
- Sharma, R., Joshi, H., & Jain, P. (2011). Short review on the crystallization behavior of PET/clay nanocomposites. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, 2, 39 - 43.
- Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 115, 409 - 422. doi:10.1016/j.compositesb.2016.09.013
- Siwal, S. S., Zhang, Q., Devi, N., Saini, A. K., Saini, V., Pareek, B., Gaidukovs, S., & Thakur, V. K. (2021). Recovery processes of sustainable energy using different biomass and wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111483. doi:10.1016/j.rser.2021.111483
- Srinivasan, S., Valsadwala, A. S., Begum, S. S., & Samui, A. B. (2021). Experimental investigation on the influence of novel catalyst in co-pyrolysis of polymeric waste: Characterization of oil and preparation of char reinforced composites. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128225. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128225
- Suhaimi, N. A. S., Muhamad, F., Abd Razak, N. A., & Zeimaran, E. (2022). Recycling of polyethylene terephthalate wastes: A review of technologies, routes, and applications. *Polymer Engineering & Science*, 62(8), 2355 - 2375. doi:10.1002/pen.26017
- Tayyar, A. E., & Üstün, S. (2010). Usage of recycled PET. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 16(1), 53 - 62.
- Tonetto, M. R., Pinto, S. C. S., Rastelli, A. de N. S., Borges, A. H., Saad, J. R. C., Pedro, F. L. M., Andrade, M. F. de, & Bandéca, M. C. (2013). Degree of conversion of polymer-matrix composite assessed by FTIR analysis. *Journal of Contemporary Dental Practice*, 14(1), 76 - 79. doi:10.5005/jp-journals-10024-1274
- Tsai, T., Laio, J., & Naveen, B. (2015). Preparation and characterization of PET/LDH or clay nanocomposites through the microcompounding process. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 62(6), 547-553. doi:10.1002/jccs.201400501

- Tufan, M., Gulec, T., Çukur, U., Akbaş, S., & İmamoğlu, S. (2015). Some properties of wood plastic composites produced from waste cups. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 15(2), 176-182.
- Valerio, O., Muthuraj, R., & Codou, A. (2020). Strategies for polymer to polymer recycling from waste: Current trends and opportunities for improving the circular economy of polymers in South America. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25, 100381. doi:10.1016/j.cogsc.2020.100381
- Verdurmen-Noel, L., Baldo, L., & Bremmers, S. (2001). SEC–FTIR characterization of semi-crystalline HDPE and PP. *Polymer*, 42(13), 5523 - 5529. doi:10.1016/S0032-3861(00)00620-0
- Woo, E. M., Sun, Y.-S., & Yang, C.-P. (2001). Polymorphism, thermal behavior, and crystal stability in syndiotactic polystyrene vs. its miscible blends. *Progress in Polymer Science*, 26(6), 945 - 983. doi:10.1016/S0079-6700(01)00010-7
- Yuan, M., Hu, M., Dai, F., Fan, Y., Deng, Z., Deng, H., & Cheng, Y. (2021). Application of synthetic and natural polymers in surgical mesh for pelvic floor reconstruction. *Materials & Design*, 209, 109984. doi:10.1016/j.matdes.2021.109984
- Zhuang, C.-H., Huangfu, W.-H., You, F., Wang, W., Zhu, Y.-S., & Fu, Z.-L. (2022). Evolution and mechanisms of low-temperature oxidation and coal–oxygen coupling processes of a specific low-rank bituminous coal with various microscale particle sizes. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 43(2), 1 - 21. doi:10.1080/19392699.2022.2051010



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### DC01 Çeliğinin Sertliğine NDK Parametrelerinin Etkisinin Çoklu Regresyon Analiziyle İncelenmesi

**Muhammed ELİTAŞ**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 11100 Bilecik, Türkiye

Muhammed ELİTAŞ, [ORCID No: 0000-0001-5358-1783](https://orcid.org/0000-0001-5358-1783)

Sorumlu yazar e-posta: [muhammed.elitas@bilecik.edu.tr](mailto:muhammed.elitas@bilecik.edu.tr)

#### Makale Bilgileri

Geliş: 05.09.2022  
Kabul: 24.01.2023  
Online Ağustos 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1171388](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1171388)

#### Anahtar Kelimeler

Çoklu regresyon analizi,  
DC01 çeliği,  
Elektrot kuvveti,  
Kaynak akımı,  
Mikrosertlik

**Öz:** Bu çalışmada DC01 çeliğine 8-10-12 kA kaynak akımı ve 1.96-2.94 kN elektrot kuvveti kaynak parametrelerinde farklı nokta direnç kaynak işlemleri uygulanmıştır. Ana metal, ısının tesiri altındaki bölge ve kaynak metali boyunca mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde kullanılan formüller ile teorik sertlik değeri hesaplanmış ve elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çoklu regresyon analizi ile kaynak parametrelerinin sertlik değeri üzerindeki önem düzeyleri belirlenmiş ve model kurulmuştur. Sonuç olarak kaynak akımı ve elektrot kuvveti arttıkça mikrosertlik değeri artmıştır. 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde teorik değere göre daha yüksek sertlik değeri bulunurken, diğer kaynak parametrelerinde daha düşük değerler elde edilmiştir. Çoklu regresyon analizi sonucunda kaynak akımının sertlik üzerindeki önem düzeyi elektrot kuvvetinden daha yüksek çıkmıştır.

### Investigation of the Effect of RSW Parameters on the Hardness of DC01 Steel with Multiple Regression Analysis

#### Article Info

Received: 05.09.2022  
Accepted: 24.01.2023  
Online August 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1171388](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1171388)

#### Keywords

DC01 steel,  
Electrode force,  
Microhardness,  
Multiple regression analysis,  
Welding current

**Abstract:** This study made different resistance spot welding combinations on DC01 steel with welding parameters of 8-10-12 kA welding current and 1.96-2.94 kN electrode force. Microhardness measurements were carried out along base metal, heat affected zone and weld metal. The theoretical hardness value was calculated using the literature's formulas and compared with the obtained experimental results. With multiple regression analysis, the importance levels of the welding parameters on the hardness value were determined, and the model was established. Consequently, the microhardness value increased as the electrode force and welding current increased. While a higher hardness value was found in 12 kA-2.94 kN welding parameters compared to the theoretical value, lower values were obtained in other welding parameters. As a result of multiple regression analysis, the importance level of welding current on hardness was higher than electrode force.

## 1. Giriş

DC01, hemen hemen tüm pres işlemleri için tasarlanmış bir çelik kalitesidir ve özellikle otomotiv endüstrisinde, çoğunlukla araba gövde panellerinin şekillendirilmesinde kullanılır. Malzeme iyi kaynaklanabilirliğe sahiptir, bu nedenle bağlantı işlemi sırasında ek işlem gerektirmez (Ambroziak ve ark., 2011). Araç gövdesi bileşenlerini birleştirme teknolojisi, büyük ölçüde Nokta Direnç Kaynağı (NDK) dâhil olmak üzere birleşimin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



Günümüzde araç gövdesi büyük oranda NDK yöntemi ile birleştirilmektedir (Gould ve ark., 2006; Daneshpour ve ark., 2009; Bina ve ark., 2014).

NDK işleminde oluşan yüksek ısı ve sonrasında hızlı soğuma neticesinde mikroyapıda değişim meydana gelmektedir. Bu bağlamda, Kaynak Metali (KM) sertliğinde Esas Metale (EM) göre artış görülmektedir. KM sertliğinin EM'e göre yaklaşık 2 kat fazla olduğu literatürde bildirilmiştir (Ma ve ark., 2008). Sertlik (S), malzemenin akma dayanımı, elastikiyet modülü, çekme dayanımı vb. diğer özellikleri hakkında da bilgi vermesi açısından çok önemlidir. Bu öneminden dolayı sertlik çalışmada değerlendirme ölçütü olarak ele alınmıştır.

Literatürde çelik malzemelerin kaynaklı birleşimlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması ile ilgili farklı çalışmalar bulunmaktadır. Mitschang ve ark. (2013) DC01- $AlMg_3$  hibrit metalleri ile karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemenin indüksiyon nokta kaynak yöntemi ile birleştirilmesi üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Fu ve ark. (2022) AZ31 Mg alaşımı ve DC01 çeliğinin sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleşiminin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Mira-Aguilar ve ark. (2016) DX51D galvanizli düşük karbonlu çelik ve DC01 çeliğinin takım destekli sürtünme kaynağını gerçekleştirmiştir. Andrade ve ark. (2019) DC01, DX51D ve HC420LA çelik sacların sürtünme karıştırma nokta kaynağı boyunca sürtünme ısı üretimi üzerinde EM karakteristiklerinin ve proses parametrelerinin etkisini değerlendirmiştir. Aksöz ve ark. (2017) kaynak prosesinin elektrik ark kaynak metodu ile birleştirilen API 5L X65 çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Ada ve ark. (2016) ise API 5L X65 çeliğinin MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Derin çekme çeliklerinin NDK birleşimleri ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Daneshpour ve ark., 2009; Budiono & Martowibowo, 2017; Valera ve ark., 2017; Yuan ve ark., 2017). Literatürde DC01 derin çekme çeliğinin farklı kaynak yöntemleri ile birleşimleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Fakat DC01 çeliğinin NDK birleşimleri için kaynak parametrelerinin KM sertliği üzerindeki etkisinin istatistiksel analiz yöntemiyle incelenmesi ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Farklı kaynak akımı ve elektrot kuvveti parametrelerinde elde edilen NDK birleşimlerinin mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinin sertlik değeri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Hesaplanan teorik kaynak metali sertlik değeri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çoklu regresyon analizi ile sertlik değeri üzerinde kaynak parametrelerinin önem düzeyi belirlenmiş ve matematiksel model kurulmuştur. Oluşturulan model doğrultusunda hesaplanan sertlik değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak benzerlik oranı tespit edilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

300x300 mm boyutlarında temin edilen 2 mm kalınlığındaki DC01 çelik saclar giyotin makasta kesilerek 100x30 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. DC01 çeliğinin kimyasal bileşimi, akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. DC01 çeliğinin kimyasal bileşimi (%) ve mekanik özellikleri

Malzeme	C	Mn	P	S	Fe
DC01	$\leq 0.12$	$\leq 0.60$	$\leq 0.045$	$\leq 0.045$	Kalan
	$R_a(N/mm^2)$	$R_m(N/mm^2)$	$A_{80}(\%)$		
	280	270-410	28		

100x30x2 mm boyutlarında hazırlanan numuneler, Hyundai HS165 kaynak robotunda 8 mm uç çaplı elektrotlar kullanılarak farklı kaynak akımı ve elektrot kuvveti değerlerinde NDK işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 1a). NDK kaynak parametreleri ve elde edilen kaynaklı birleşim sırasıyla Çizelge 2 ve Şekil 1b'de gösterilmiştir.



Çizelge 2. NDK işlem parametreleri

Kaynak akımı (kA)	Elektrot kuvveti (kN)	Kaynak süresi (s)	Ön sıkma süresi (s)	Soğutma süresi (s)
8	1.96	0.5	0.12	0.14
8	2.94	0.5	0.12	0.14
10	1.96	0.5	0.12	0.14
10	2.94	0.5	0.12	0.14
12	1.96	0.5	0.12	0.14
12	2.94	0.5	0.12	0.14



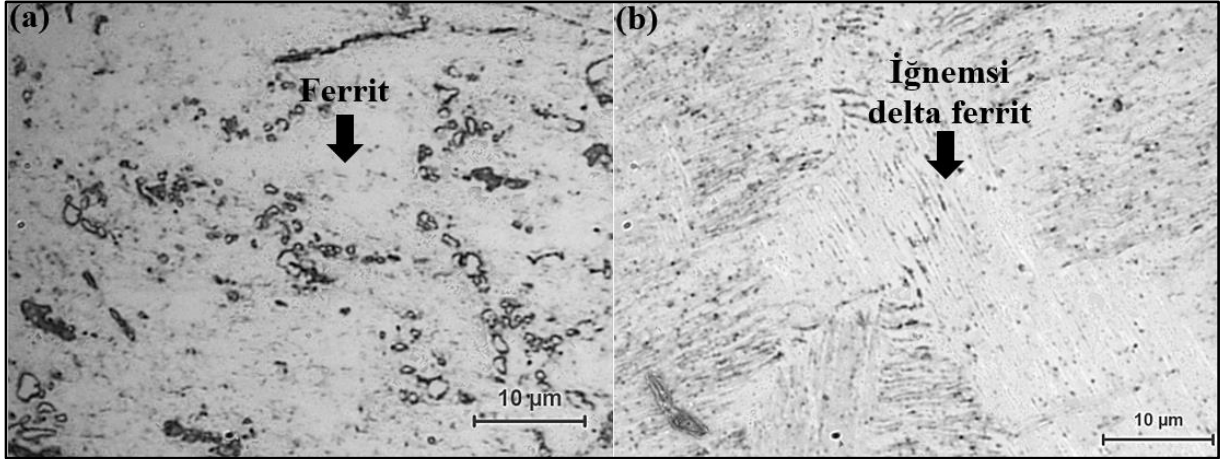
Şekil 1. NDK işlemi deney düzeneği (a) Kaynak robotu, (b) Elde edilen kaynaklı birleşim.

Mikroyapı incelemeleri için 120, 220, 360, 600, 800, 1000, 1200, 1500 ve 2000 mesh zımparalar kullanılarak zımparalama işlemi yapılmıştır. Sırasıyla 3 µm ve 1 µm elmas solüsyonlar ile 3 µm ve 1 µm çuhalarda parlatma işlemleri yapılarak %2 nital (%98 metanol+%2 nitrik asit) çözeltisinde dağlama işlemi 4 saniye süreyle gerçekleştirilmiştir. Vickers mikrosertlik deneyleri Emcotest marka DuroScan 20 model Vickers sertlik ölçüm cihazıyla EM, ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) ve KM sırasıyla eksenlere paralel olarak HV 1 değerinde yük 10 saniye uygulanarak gerçekleştirilmiştir. EM, ITAB ve KM bölgelerinde farklı noktalardan 3'er ölçüm olmak üzere toplamda 15 ölçüm gerçekleştirilmiştir. Çoklu regresyon analizi için IBM SPSS STATISTICS 22.0 programı kullanılmıştır. Sonuçlar karşılaştırılarak kaynak parametrelerinin sertlik üzerindeki önem düzeyleri belirlenmiş ve matematiksel model oluşturulmuştur.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Mikroyapı

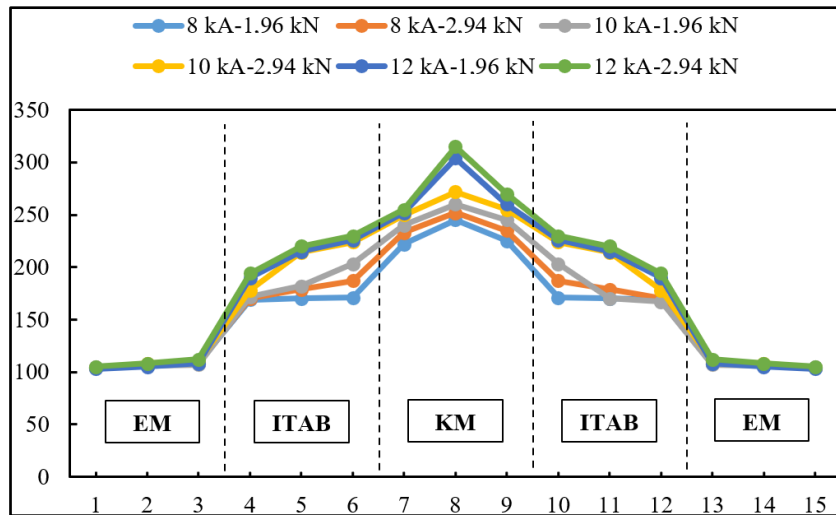
NDK işlemi uygulanan DC01 çeliğinin EM ve KM optik mikroskop (OM) görüntüleri Şekil 2.'de gösterilmiştir. EM ağırlıklı olarak ferrit fazından oluşmaktadır. KM ise NDK işleminde meydana gelen yüksek ısı girdisi ve hızlı soğuma sonucunda ağırlıklı olarak iğnemsî delta ferrit fazından oluştuğu görülmüştür (Kianersi ve ark., 2014).



Şekil 2. DC01 çeliğinin EM ve KM mikroyapı görüntüleri (a) EM, (b) KM.

#### 3.2. Mikrosertlik

DC01 çeliğinin farklı elektrot kuvveti, kaynak akımı parametrelerinde NDK birleşimleri için EM, ITAB ve KM bölgelerinde eksenlere paralel doğrultuda ölçülen sertlik değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Mikrosertlik sonuçları.

Şekil 3 incelendiğinde tüm kaynak parametrelerinde sertlik değerlerinin EM, ITAB, KM boyunca arttığı görülmektedir. EM'den KM'e doğru NDK işleminde meydana gelen yüksek ısı girdisi sebebiyle sertlik değerlerinin artış gösterdiği literatürde bildirilmiştir (Gould ve ark., 2006; Ma ve ark., 2008; Khan ve ark., 2008; Pal & Bhowmick, 2012; Holovenko ve ark., 2013). Kaynak akımı ve elektrot kuvveti arttıkça KM sertlik değerleri artmıştır. KM sertlik değerleri 8 kA-1.96 kN, 8 kA-2.94

kN, 10 kA-1.96 kN, 10 kA-2.94 kN, 12 kA-1.96 kN, 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde sırasıyla 245 HV, 252 HV, 260 HV, 272 HV, 304 HV ve 315 HV elde edilmiştir.

Beklenen KM sertliği, esasında çelik bileşimindeki alaşım seviyelerinin bir fonksiyonudur. Karbon Eşdeğerliği (CE), alaşım elementlerinin çelik sertleşebilirliği üzerindeki etkileri ile ilgili bir indeks ölçüsü sağlar. Literatürde birçok alaşım elementlerini dikkate alan çoklu CE eşitlikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan CE formülü şu şekildedir (Eşitlik 1) (Khan ve ark., 2008):

$$CE_Y = C + A(C) \times \left\{ 5B + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right\} \quad (1)$$

$$A(C) = 0.75 - 0.25 \tanh\{20(C - 0.12)\}$$

CE<sub>Y</sub> Yurioka karbon eşdeğerliği ve A(C) uyum faktörüdür. Uyum faktörü, eğer karbon içeriği %0.08 değerinden düşükse 0.5'e, karbon içeriği %0.18'in üzerinde ise 1'e yükselmektedir. Uyum faktörü, CE<sub>Y</sub>'nin karbon içeriği 0.02 ile 0.2 arasında değişen çelik alaşımlarında uygulanabilir olmasını sağlamaktadır. Kimyasal bileşimin zenginleşmesi, daha yüksek CE değerine neden olmakta ve bu durum da KM sertliğinin artmasını sağlamaktadır. CE<sub>Y</sub> KM sertliği ve EM kimyasal bileşimi arasında kuvvetli doğrusal ilişki göstermektedir. KM sertliği ve CE arasındaki doğrusal ilişkiyi gösteren formül ise Eşitlik 2'de verilmiştir (Khan ve ark., 2008).

$$HV_{KM} = 630 \times CE_Y + 188 \quad (2)$$

Eşitlik 2'de verilen HV<sub>KM</sub>, KM bölgesinin Vickers sertliğini ve CE<sub>Y</sub> ise Eşitlik 1'de hesaplanan CE değerini ifade etmektedir. Eşitlik 2, çeliklerin NDK KM sertliğini belirlemek için gelişmiş metot sunmaktadır. Geniş aralıkta kimyasallar için uyum faktörü içeren Yurioka CE eşitliğiyle, NDK KM sertliği ve kimyasallar arasında daha güvenilir ilişki yapılabilir (özellikle NDK şartlarında). Bu çalışmada kullanılan DC01 için Çizelge 1'de verilen kimyasal bileşim değerleri kullanılarak Eşitlik 1'e göre A (C) değeri 0.75 ve CE<sub>Y</sub> değeri ise 0.195 elde edilir. CE<sub>Y</sub> değeri Eşitlik 2'de kullanıldığında ise 310.85 değeri elde edilmektedir. Hesaplanan teorik KM sertlik değeri ve deneyler sonucunda elde edilen KM sertlik değerleri Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Teorik ve deneyler sonucunda elde edilen KM sertlik değerleri (HV)

Teorik değer	8 kA 1.96 kN	8 kA 2.94 kN	10 kA 1.96 kN	10 kA 2.94 kN	12 kA 1.96 kN	12 kA 2.94 kN
310.85	245	252	260	272	304	315

Çizelge 3 incelendiğinde hesaplanan teorik sonuç, uygulama sonuçları ile karşılaştırıldığında 12 kA kaynak akımında her iki elektrot kuvveti değeri için teorik değere yakın sonuçlar elde edilmiştir. 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde teorik değere göre daha yüksek sertlik değeri bulunurken, diğer kaynak parametrelerinde daha düşük değerler elde edilmiştir.

### 3.3. Çoklu regresyon analizi

Çoklu regresyon iki ve daha fazla değişkenin bir bağımlı değişkeni açıklamasıdır. Bu analiz yöntemi birden fazla değişkendeki bilgiyi kullanarak modelleme yapmaktadır. Korelasyon iki değişken arasındaki ilişkidir. Genel olarak sürekli değişkenler arasındaki ilişkiler için kullanılır. Korelasyonun aldığı değerler işaretli ilişkinin yönünü belirtir. Pozitif yönlü ilişkilerde korelasyon değerinin işareti pozitif iken negatif yönlü ilişkilerde korelasyon değerinin işareti negatiftir. Korelasyon mutlak değeri 0-1 arasında bir değer alır. 1'e yakın değerler pozitif ilişki, 0'a yakın değerler ise negatif ilişkiyi göstermektedir (Yavuz ve ark., 2020; Gökçe, 2021; Gökçe & Biberici, 2022).

Bağımsız değişkenler arasında korelasyon ilişkisinin yüksek düzeyde çıkmaması beklenir. Çizelge 4 incelendiğinde analizde kaynak akımı ve elektrot kuvveti arasında 0.00'luk bir değer ile ilişki

olmadığı görülmüştür. Yani bu değer modelde beklenen varsayımı desteklemektedir. Kaynak akımı ve sertlik değeri arasında 0.952 ile yüksek düzeyde bir ilişki bulunurken, elektrot kuvveti ve sertlik arasında 0.191 ile düşük düzeyde bir korelasyon ilişkisi olduğu gözlemlenmiştir. [Feujofack Kemda ve ark. \(2020\)](#), ASTM A36 ve ASTM A653 çeliklerinin NDK işlemi üzerine yaptıkları çalışmada kaynak metali sertliğini etkileyen en önemli parametrenin kaynak akımı olduğunu bildirmişlerdir.

Çizelge 4. Korelasyonlar

		Sertlik	Kaynak akımı	Elektrot kuvveti
Pearson Korelasyon	Sertlik	1.000	.952	.191
	Kaynak akımı	.952	1.000	.000
	Elektrot kuvveti	.191	.000	1.000

R değeri korelasyon katsayısını gösterir. Determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) değeri bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki toplam değişimi ne kadar açıkladığını gösterir. Düzeltilmiş  $R^2$  değeri ise bir değişkenin tek başına etkisi ile sonradan eklenen bir değişkenin etkisi olup olmadığını gösterir. Analizde R değeri 0.971 bulunurken, düzeltilmiş  $R^2$  değeri 0.906 çıkmıştır (Çizelge 5). Bu değerler 1'e ne kadar yakınsa ilişki düzeyi ve açıklanabilirlik o kadar yüksektir. Yani değişkenler arasında yüksek düzeyde bir ilişki bulunduğu söylenebilir. Düzeltilmiş  $R^2$  değeri eğer  $R^2$  değerine yakınsa yeni bir değişken eklemeye gerek olmadığı sonucuna varılır. Burada düzeltilmiş  $R^2$  değeri 0.906 olarak bulunmuştur ve  $R^2$  değerine (0.943) oldukça yakındır. Bu sonuca göre yeni bir değişken eklemeye gerek olmadığı görülmektedir. Durbin Watson analizi ise çoklu doğrusal regresyon varsayımlarından birini teyit etmek için kullanılan bir analizdir. Otokorelasyonun değişkenler arasında olup olmadığını gösterir. 1.5 ile 2.5 arasında olması kabul edilir. Bulunan değer 1.302'dir ve alt sınıra yakın olduğu için otokorelasyon ihmal edilebilir.

Çizelge 5. Model özeti

Model	R	$R^2$	Düzeltilmiş $R^2$	Tahminin Standart Hatası	Durbin-Watson
1	.971 <sup>a</sup>	.943	.906	8.80025	1.302

Anova (varyans analizi), modelin bir bütün olarak anlamlı olup olmadığını göstermektedir. Çizelge 6 incelendiğinde önem derecesi 0.013 < 0.05 olduğundan bu model istatistiksel olarak anlamlıdır. Bulunan F değeri 24.992'dir.  $F_{hesap}=24.992 < F_{(3,2)}=30.817$  olarak bulunmuştur. Dolayısıyla hesaplanan F değeri F tablo değerinden küçük olduğu için kurulan modelin anlamlılığını desteklemektedir.

Çizelge 6. ANOVA

Model	Karelerin Toplamı	Serbestlik Derecesi	Karelerin Ortalaması	F	Önem Düzeyi
1	3871.000	2	1935.500	24.992	.013 <sup>b</sup>
Regresyon Artıklar	232.333	3	77.444		

Çizelge 7'de katsayılar tablosu gösterilmiştir. Kaynak akımı değişkeninin önem derecesi 0.006 < 0.05 olduğundan sertlik derecesi üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkiye sahiptir. Elektrot kuvveti 0.258 > 0.05 olduğundan sertlik derecesi üzerinde anlamlı bir etkiye sahip değildir. B katsayısındaki sabit değer, bağımsız değişkenler 0 olsa bile belirli bir sertlik değerinin ölçüldüğünü ifade etmektedir. Kaynak akımı, sertlik derecesi üzerinde 15.250 oranında etki etmektedir. Yani kaynak akımındaki 15.250 birimlik değişim sertlik üzerinde 1 birimlik artışa neden olmaktadır. Aynı şekilde elektrot kuvvetindeki 10.204 birimlik değişim sertlik üzerinde 1 birimlik artışa sebep olmaktadır. Yalnız elektrot kuvvetinin önem düzeyi anlamlı olmadığı için buradaki değişim ihmal edilebilir düzeydedir.

Standardize Beta katsayılarına bakıldığında kaynak akımının yüzde 95.2'lik bir etkiye sahip olduğu saptanırken elektrot kuvvetinin yüzde 19.1 lik düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. t değerleri incelendiğinde ise aynı şekilde kaynak akımı 6.932'lik bir etkileme oranına sahipken elektrot kuvvetinin 1.392'lik düşük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Tolerans ve Varyans Artış Faktörü (VIF) değerleri incelendiğinde ise; öncelikle tolerans değerinin 0.20'nin altında olmaması beklenirken yapılan analizde 1.00 çıkmıştır. Yani bu varsayımı desteklemektedir. VIF değerinin ise 10'un altında olması beklenmektedir. Çalışmamızda 1.00 bulunarak bu varsayımı da sağladığı görülmektedir. Sonuç olarak bu değerler de modelin anlamlılık düzeyini pozitif yönde etkilemektedir.

Çizelge 7. Katsayılar

Model	B	Std. Hata	Standart Katsayı Beta	t	Önem Derecesi	Tolerans	VIF
Sabit (Sertlik)	97.167	28.629		3.394	.043		
Kaynak akımı	15.250	2.200	.952	6.932	.006	1.000	1.000
Elektrot kuvveti	10.204	7.332	.191	1.392	.258	1.000	1.000

Bağımsız olarak hesaplanan değişkenlerin, bağımlı değişkeni tahmin ettiği düşünülen formülasyonda aşağıdaki hipotezler kurulmuştur:

$H_0$ =Model anlamsızdır.

$H_s$ =Model anlamlıdır

Gerçekleştirilen analizler ve kıyaslanan değerler ışığında modelimizin anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır. S, elektrot kuvveti (EK) ve kaynak akımı (KA) arasında kurulan model Eşitlik 3'te gösterilmiştir.

$$S = 97.167 + (15.250 \times KA) + (10.204 \times EK) \quad (3)$$

Eşitlik 3'te oluşturulan model dikkate alınarak hesaplanan sertlik değerleri ve deneysel sonuçlar Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. Kurulan modele göre hesaplanan sertlik değerleri ve deneysel sonuçlar (HV)

Sertlik değerleri	8 kA 1.96 kN	8 kA 2.94 kN	10 kA 1.96 kN	10 kA 2.94 kN	12 kA 1.96 kN	12 kA 2.94 kN
Teorik	239.17	249.17	269.67	279.67	300.17	310.17
Deneysel	245	252	260	272	304	315

Çizelge 8 incelendiğinde kurulan modele göre hesaplanan sertlik değerleri ile deneysel sonuçlar arasında yaklaşık olarak %1-3 aralığında farklılık bulunmaktadır. Bu durum kurulan modelin deneysel sonuçlara yaklaşık %97-99 oranında benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. 8 kA-1.96 kN, 8 kA-2.94 kN, 12 kA-1.96 kN ve 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde teorik sertlik değerlerinin deneysel sonuçlara göre daha düşük olduğu, 10 kA-1.96 kN ve 10 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde ise teorik sertlik değerlerinin deneysel sonuçlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

#### 4. Sonuç

NDK DC01 çeliğinin KM sertlik değeri üzerinde farklı KA ve EK parametrelerinin etkisinin değerlendirildiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekildedir;



1. DC01 çeliğinin EM mikroyapısının ağırlıklı olarak ferrit fazından, KM mikroyapısının ise iğnemsiz delta ferrit fazından oluştuğu görülmüştür.
2. Tüm kaynak parametrelerinde sertlik değerleri EM'den KM'e doğru artmıştır.
3. Kaynak akımı ve elektrot kuvveti arttıkça sertlik değerleri artmıştır.
4. 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde teorik değere göre daha yüksek sertlik değeri bulunurken, diğer kaynak parametrelerinde daha düşük değerler elde edilmiştir.
5. KM sertlik değerini etkileyen en önemli parametrenin kaynak akımı olduğu görülmüştür.
6. Kaynak akımı, elektrot kuvveti ve sertlik arasında çoklu regresyon modeli başarıyla kurulmuştur. Modelin deneysel sonuçlara yaklaşık %97-99 oranında benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

## Kaynakça

- Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., & Candan, İ. (2016). API 5L X65 çeliklerinin mag kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS1), 1–9. doi:10.21605/cukurovaummfd.311031
- Aksöz, S., Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., & Candan, İ. (2017). API 5L X65 çeliklerinin elektrik ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *El-Cezeri*, 4(1), 72-81. doi: 10.31202/ecjse.289639
- Ambroziak, A., Tobota, A., Tokarz, K., & Kustron, P. (2011). Testing of thin-walled steel joints fabricated by spot welding and plug welding. *Welding International*, 25(4), 277–282. doi:10.1080/09507116.2010.540833
- Andrade, D. G., Leitão, C., & Rodrigues, D. M. (2019). Influence of base material characteristics and process parameters on frictional heat generation during Friction Stir Spot Welding of steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 98–104. doi:10.1016/j.jmapro.2019.05.015
- Bina, M. H., Jamali, M., Shamanian, M., & Sabet, H. (2014). Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(9–12), 1371–1379. doi:10.1007/s00170-014-6220-x
- Budiono, Y. K., & Martowibowo, S. Y. (2017). Optimization of resistance spot welding process using response surface methodology and simulated annealing. *Manufacturing Technology*, 17(4), 434–440. doi:10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/4/434
- Daneshpour, S., Riekehr, S., Kocak, M., & Gerritsen, C. H. J. (2009). Mechanical and fatigue behaviour of laser and resistance spot welds in advanced high strength steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(1), 20–25. doi:10.1179/136217108X336298
- Feujofack Kemda, B. V., Barka, N., Jahazi, M., & Osmani, D. (2020). Optimization of resistance spot welding process applied to A36 mild steel and hot dipped galvanized steel based on hardness and nugget geometry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(5), 2477–2491. doi:10.1007/s00170-019-04707-w
- Fu, X., Chen, K., Liu, C., Wang, M., & Hua, X. (2022). Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir lap welding between AZ31 Mg alloy and DC01 steel. *Materials Characterization*, 187, 111870. doi:10.1016/j.matchar.2022.111870
- Gökçe, H. (2021). Modelling and optimization for thrust force, temperature and burr height in drilling of custom 450. *Experimental Techniques*, 46, 707–721. doi:10.1007/s40799-021-00510-z
- Gökçe, H., & Biberici, M. A. (2022). Investigation of thrust force, drill bit temperature and burr height in the drilling of aluminum alloy used in ammunition wing drive systems. *Experimental Techniques*, 46(4), 691–705. doi:10.1007/s40799-021-00501-0
- Gould, J. E., Khurana, S. P., & Li, T. (2006). Predictions of microstructures when welding automotive advanced high-strength steels. *Welding Journal*, 85(5), 111-116.
- Holovenko, O., Ienco, M. G., Pastore, E., Pinasco, M. R., Matteis, P., Scavino, G., & Firrao, D. (2013). Microstructural and mechanical characterization of welded joints on innovative high-strength steels. *La Metallurgia Italiana*, 3, 3-12.
- Khan, M. I., Kuntz, M. L., Biro, E., & Zhou, Y. (2008). Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels. *Materials Transactions*, 49(7), 1629-1637. doi:10.2320/matertrans.MRA2008031



- Kianersi, D., Mostafaei, A., & Amadeh, A. A. (2014). Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations. *Materials & Design*, 61, 251–263. doi:10.1016/j.matdes.2014.04.075
- Ma, C., Chen, D. L., Bhole, S. D., Boudreau, G., Lee, A., & Biro, E. (2008). Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 485(1–2), 334–346. doi:10.1016/j.msea.2007.08.010
- Mira-Aguiar, T., Verdera, D., Leitão, C., & Rodrigues, D. M. (2016). Tool assisted friction welding: A FSW related technique for the linear lap welding of very thin steel plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 73–80. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.07.006
- Mitschang, P., Velthuis, R., & Didi, M. (2013). Induction spot welding of metal/CFRPC hybrid joints. *Advanced Engineering Materials*, 15(9), 804–813. doi:10.1002/adem.201200273
- Pal, T. K., & Bhowmick, K. (2012). Resistance spot welding characteristics and high cycle fatigue behavior of DP 780 steel sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(2), 280–285. doi:10.1007/s11665-011-9850-2
- Valera, J., Miguel, V., Martínez, A., Naranjo, J., & Cañas, M. (2017). Optimization of electrical parameters in Resistance Spot Welding of dissimilar joints of micro-alloyed steels TRIP sheets. *Procedia Manufacturing*, 13, 291–298. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.074
- Yavuz, M., Gökçe, H., Çiftçi, İ., Gökçe, H., Yavaş, Ç., & Şeker, U. (2020). Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9), 4623–4633. doi:10.1007/s00170-019-04843-3
- Yuan, X., Li, C., Chen, J., Li, X., Liang, X., & Pan, X. (2017). Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 239, 31–41. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.08.012



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Magnetron Sputtering ile Ti6AL4V Üzerindeki Gümüş Kaplamaların Korozyon ve Antibakteriyel Özelliklerinin Karşılaştırılması

Emrah MELETLİOĞLU\*, Recep SADELER

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25242, Erzurum, Türkiye  
Emrah MELETLİOĞLU, ORCID No: 0000-0002-6123-1609, Recep SADELER, ORCID No: 0000-0001-5380-9733

\*Sorumlu yazar e-posta: emrahmeletli@atauni.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 13.09.2022  
Kabul: 24.01.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1174555

#### Anahtar Kelimeler

Antibakteriyel özellik,  
DC püskürtme,  
Gümüş,  
Korozyon,  
Ti6Al4V

**Özet:** Bu çalışmanın amacı, dental implant malzemesi olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımının yüzeyine PVD (Magnetron Sputtering) yöntemi ile biriktirilen gümüş tabakasının korozyon davranışını ve antimikrobiyal etkisini belirlemektir. Kaplamalar, aynı kaplama koşulları altında farklı biriktirme süreleri kullanılarak elde edilmiştir. Kaplamaların kesit morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM), fazları ise X-ışını difraksiyonu (XRD) kullanılarak tespit edilmiştir. PVD yöntemi ile kaplanmış ve işlemsiz Ti6Al4V numunelerin üzerinde korozyon deneyleri Kokubo'nun simüle edilmiş vücut sıvısı (SBF) pH 7.0 ve 36.5 °C çözeltisi içinde ve normal atmosfer şartlarında gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, in vitro anti-bakteriyel etkinlik deneylerinde numunelerin yüzeylerine E. coli (Escherichia coli) ve S. aureus (Staphylococcus aureus) mikroorganizmaları sürülerek kaplamanın antibakteriyel özelliği araştırılmıştır. Antibakteriyel özelliklerini ölçmek için ise plaka sayma yöntemi kullanılmıştır. XRD sonuçlarına göre numunelerin yüzeylerindeki kaplama tabakalarının homojenliği, SEM analiziyle elde edilen kesit morfolojileri ile de desteklenmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon test sonuçları, gümüş kaplamadan sonra korozyon direncinin arttığını göstermektedir. In vitro anti-bakteriyel etkinlik deneyleri sonucunda, PVD ile kaplanmış numunelerde E. Coli ve S.Aureus mikroorganizmalarının tutunumu, kaplanmamış numuneye göre daha az çıkması, kaplamanın anti-bakteriyellik yönünden uygun olduğunu göstermiştir.

### Comparison of Corrosion and Antibacterial Properties of Silver Coatings on Ti6AL4V by Magnetron Sputtering

#### Article Info

Received: 13.09.2022  
Accepted: 24.01.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1174555

#### Keywords

Antibacterial features,  
Corrosion,  
DC Sputter,  
Silver,  
Ti6Al4V

**Abstract:** This study aims to determine the corrosion behavior and antimicrobial effect of the silver layer deposited on the surface of the Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alloy, which is used as a dental implant material, by the PVD (Magnetron Sputtering) method. Coatings were obtained using different deposition times under the same coating conditions. The cross-sectional morphologies of the coatings were determined using scanning electron microscopy (SEM), and the phases were determined using X-ray diffraction (XRD). Corrosion experiments on PVD-coated and untreated Ti6Al4V samples were carried out in Kokubo's simulated body fluid (SBF) pH 7.4 and 36.5 °C solution and under normal atmospheric conditions. In addition, the antibacterial properties of the coating were investigated by applying E. coli (Escherichia coli) and S. aureus (Staphylococcus aureus) microorganisms on the surfaces of the samples in vitro antibacterial activity experiments. The plate counting method was used to measure its antibacterial properties. According to the XRD results, the homogeneity of the coating layers on the surfaces of the samples was also supported by the section morphologies obtained by SEM

analysis. The potentiodynamic polarization test results show that corrosion resistance increases after silver plating. As a result of in vitro antibacterial activity tests, the adhesion of E. Coli and S. Aureus microorganisms in the PVD-coated samples and the less outgrowth of the uncoated samples showed that the coating was suitable in terms of antibacterial.

## 1. Giriş

Tıp endüstrisinde benzersiz mekanik özelliklere, korozyon ve yorulma direncinin yanı sıra biyouyumluluğa sahip biyomalzemelere ihtiyaç duyulmaktadır (Liu ve ark., 2019). Medikal endüstri alanında, saf titanyum (CP-Ti) alaşımları, düşük elastisite modülü, mükemmel mukavemet/ağırlık oranı, korozyona karşı üstün direnç, kolay imalat, vb. nedeniyle implant uygulamaları için kullanılır (Elias ve ark., 2008). Bununla birlikte, saf titanyumun (CP-Ti) en büyük dezavantajı, cilalama zorluğu, düşük mukavemeti ve zayıf aşınma direncidir. Bu veriler ışığında, Ti6Al4V alaşımı sahip olduğu mekanik ve biyouyumluluk özellikleri nedeniyle ilgi görmüştür. Yapılan çalışmalar, Ti6Al4V alaşımının daha iyi korozyon direnci ve yüksek mukavemette iyi sonuçlar verdiğine dikkat çekmektedir (Injeti ve ark., 2019). Ancak, tıbbi uygulamalardaki aktif araştırmalara rağmen, implantlar ve protezlerle ilgili enfeksiyon veya iltihaplanma sorunu hala devam etmektedir (Vasilev ve ark., 2009). İmplantlara bağlı bakteriyel enfeksiyonlar, implant veya protez yüzeyinde iltihaplanmaya neden olarak geri dönüşü olmayan implant kayıplarına neden olur (Yanovska ve ark., 2014). Bu ciddi duruma ek olarak korozyon da biyouyumluluğu ve mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilir. Ağız içerisindeki ortam sürekli değişen pH değerlerinden dolayı korozif bir bölge olarak kabul edilir (Licausi ve ark., 2013). Bundan dolayı, metalik implantlar vücut ortamına yerleştirildiklerinde korozyona uğrayabilmektedirler. Çiğneme esnasında metalik implantlarda, elektrokimyasal reaksiyonlar oluştuğunda iyon salınımı gerçekleşmektedir. Bu süreçte kullanılan implantların biyouyumluluğu azalır, vücutta istenmeyen alerjik reaksiyonlara ve komplikasyonlara sebep olabilirler (Taddei ve ark., 2004). Bu yüzden yüzeye bakteri yapışmasını önlemek, implant enfeksiyonlarını daha da azaltmak ve korozyon gibi olumsuz etkileri gidermek için titanyum implantlarının antibakteriyel malzemelerle kaplanması gerekmektedir.

Titanyum implantların yüzeyi, bakteri yapışmasını önlemek ve implant enfeksiyonlarını azaltmak için çeşitli antibakteriyel malzemelerle (Ag, Cu, Zn vb.) kaplanır (Franci ve ark., 2015). Bu malzemeler içinden gümüş, çok çeşitli antibakteriyel özellikleri nedeniyle bir adım daha öne çıkmaktadır. Gümüşün ilgi çekici özelliği geç antik çağlardan beri bilinmektedir. Ayrıca bu elementin insan vücudundaki düşük toksisitesinden dolayı, ameliyat sırasında ve sonrasında bakteri tutunmasını engellediği de varsayılmaktadır (Stuart ve ark., 2022). Gümüş partikülleri bakteri ve mikroorganizmaların hücre duvarı ve hücre zarından geçerek bu bakteri ve mikroorganizmaların DNA'sını inhibe eder (Taglietti ve ark., 2014). Sonuç olarak, biyomalzemeler söz konusu olduğunda, bu tip gümüş yüzey modifikasyonları, özellikle temas öldürme aktivitesi yoluyla bakteri kolonizasyonunu önleyebilir. Son zamanlarda, nano yapı bir filmde gümüşün, yara iyileşme periyodu esnasında mükemmel antibakteriyel yetenek sergilediği de görülmüştür (Mao ve ark., 2017). Yüzey modifikasyonu yoluyla antibakteriyel kaplamaların doğrudan uygulanması basit ve uygun maliyetli bir yaklaşımdır. Biyomalzemelerin korozyon direncini, mekanik ve aşınma özelliklerini geliştirmek için bazı yüzey işleme ve kaplama yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır (Ye ve ark., 2009). Özellikle DC magnetron püskürtme yöntemi, titanyum alaşımları için düzgün yüzey fizibilitesi, daha kısa biriktirme zaman aralıkları ve diğer yüzey modifikasyon yöntemlerine kıyasla nispeten daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmesi gibi avantajlara sahiptir (Del Re ve ark., 2002). Ancak korozyon ve antibakteriyel özellikleri etkileyen faktörlerin belirlenerek gümüş miktarının optimize edilmesi ve bu yöntemlerin etkinliğinin artırılması biyomedikal bilimlerin önemli bir problemidir.

Bu araştırmanın temel amacı, Ti6Al4V alaşımları üzerindeki gümüş tabakasının korozyon ve antibakteriyel özellikleri üzerine PVD kaplama süresinin etkilerini incelemektir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Materyal

13 mm kalınlığındaki Ti6Al4V alaşım numuneleri, 20 mm çapındaki silindirik bir çubuktan tel kesme ile kesilmiş ve kimyasal kompozisyonu Çizelge 1’de verilmiştir. Numunelerin mekanik parlatılması için 200’den 1600’e kadar farklı boyutlardaki SiC grit kağıtları kullanılmıştır. Bu çalışmada, numunelerin osteoblast aktivitesini artırmak için asit ile pürüzlendirme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için %60’lık H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi, %10’luk HCl çözeltisi ve distile su, sırasıyla, 1:1:2 oranında karıştırılarak bir asit çözeltisi hazırlanmıştır. Asit ile pürüzlendirme işlemine tabi tutulacak numuneler sıcaklığı 100 °C olacak bu asit çözeltisine 20 dk boyunca daldırılmıştır. Daha sonra numuneler distile suda 10 dk boyunca ultrasonik titreştirici ile temizlenmiştir.

Çizelge 1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal kompozisyonu

Element	Al	V	Fe	Ti	Other
Kompozisyon (%Ağırlık)	6	4.1	<0.30	Kalan	0.40

Çizelge 2. Gümüş kaplamalar için deney şartları

Numune Adı	Kaplama Türü ve Süresi	Kaplama Şartları (DC)
Ti6Al4V	Ag Kaplama 30 Dk	İyonlaşma Gazı: Argon (99.999%) Target Açısı : 35 °
Ti6Al4V	Ag Kaplama 45 Dk	Target Uzaklığı 11.8 cm Basınç : 6,8x10 <sup>-3</sup> mTorr Sıcaklık: 20 °C
Ti6Al4V	Ag Kaplama 60 Dk	Dönme Hızı: 3 rpm DC Gücü: 100 W

Ti6Al4V alaşımlarının gümüş filmler ile PVD kaplama işlemi Üniversitemiz Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (DAYTAM) yer alan temiz odada yapılmıştır. Gümüş kaplamalar için püskürtme zamanları hariç sabit deney koşulları seçilmiş olup, kullanılan deney planları ise Çizelge 2’de verilmiştir. Sabit deney koşulları seçilmesinin temel amacı malzeme yüzeyinde tek bir proses ile kompozit kaplama elde etmektir. Kaplama işleminin hemen öncesinde numuneler, etil alkol içerisinde ultrasonik temizleme işlemine tabi tutulmuş, ardından PVD Sistemi içerisine yerleştirilmiştir. Kaplama kalınlığının üniform olması için taban malzemeler 3 rpm hızında döndürülmüştür. PVD kaplamalarda gümüş katı hedeflerden sıçratma yapılmış ve iyonlaşma gazı olarak sadece argon kullanılmıştır. Düşük gerilmeli, yoğun, tok ve üniform bir film yapısı elde etmek için taban malzemelere, darbeli doğru akım (pulsed-dc) verilmiş ve sistem içerisinde taban malzemeler yine 3 rpm hızında döndürülmüştür.

### 2.2. Kaplamaların mikroyapı analizleri

Numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri, bir prob ucu mekanik profilometrisi (Kla Tencor Stylus Profile P7) kullanılarak değerleri ölçülmüştür. Yüzey özelliklerini tanımlamak ve değerlendirmek için kaydedilen tüm ölçümler, her numunede 100x100 µm alanın analiz edilmesiyle elde edilmiştir. Kaplanan yüzeylerin morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (Quanta FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ti6Al4V alaşımlarının, DC manyetik alanda sıçratma yöntemi ile büyütülen gümüş filmlerin kristalografik yönelmelerin tespitinde,  $\lambda=1.5418$  Å (0,154 nm) dalga boyuna sahip Cu-K $\alpha$  kaynaklı GNR explorer XRD (X ışını kırınım ölçer) cihazı kullanılmış olup, çalışma şartları olarak -111-168 derece tarama açısı aralığında, 1 derece/dak tarama hızında, 0.0001 derece tarama adımında ve max 60 kV, max 100 mA enerji değerlerinde analizler yapılmıştır.

### 2.3. Elektrokimyasal korozyon deneyleri

PVD yöntemi ile kaplanmış numuneler ve taban malzeme Ti-6Al-4V alaşımları üzerinde korozyon deneyleri Kokubo'nun simüle edilmiş vücut sıvısı (SBF) pH 7.0 ve 36.5 °C çözeltisi içinde (Kokubo & Takadama, 2006), normal atmosfer şartlarında ve Gamry Series G 750 potansiyostat/galvanostat polarizasyon test cihazında gerçekleştirilmiştir. SBF'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3'de verilmiştir. SBF hazırlamak için reaktif dereceli NaHCO<sub>3</sub>, NaCl, KCl, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> · MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O, 3H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> distile suda çözüldü. Reaktiflerin çözünmesi sırasında sıcaklık ve pH değerleri de ayrıca kontrol edildi.

Çizelge 3. Güncellenmiş simüle vücut sıvısı hazırlamak için kullanılan çözeltiler pH 7.00 (Kokubo & Takadama, 2006)

Kimyasal	1 L SBF için gerekli miktar
NaCl	8.035 g
NaHCO <sub>3</sub>	0.355 g
KCl	0.225 g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O	0.231 g
MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.311 g
1 kmol/m <sup>3</sup> HCl	39 ml
CaCl <sub>2</sub>	0.292 g
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.072 g
Tris ((CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> CNH <sub>2</sub> )	6.118 g
1.0M-HCl	0-5 ml

Polarizasyon ölçümleri; Ag/AgCl referans elektrot (RE), karşıt elektrot (CE) olarak platin tel ve çalışma elektrotu (WE) deney numunesi kullanılarak üç elektrot tekniğine göre 0.29 cm<sup>2</sup> lik alanda yapılmıştır. Her test için yeni bir solüsyon kullanılmıştır. Numune açık devre potansiyeline (OCP) erişinceye kadar yaklaşık 60 dakika bekletilmiştir. Tafel deneylerinde başlangıç ve bitiş potansiyel değerleri açık devre potansiyeli (Eoc) olarak ölçülmüştür. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri, 0,5 mV s<sup>-1</sup>lik bir tarama hızında -2000 mV - Ocp +2000 mV - Ref'den tarama yapılarak gerçekleştirilmiştir.

### 2.4 Antibakteriyel test

Numunelere uygulanan antibakteriyel test Atatürk Üniversitesi Tıp Fakültesi Tıbbi Mikrobiyoloji Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Ti6Al4V numunelerinin antibakteriyel özelliklerini ölçmek için plaka sayma yöntemi kullanılmıştır (Zhu ve ark., 2015, Patil ve ark., 2019). Test için iki bakteri türü, Escherichia coli ATCC25922 ve Staphylococcus aureus ATCC25923 kullanılmıştır. Bakterilerin donmuş tozları pH ¼ 7.2 olan bir kültür ortamında çözüldürüldü ve 37 °C'de 24 saat yetiştirildi. Daha sonra bakteri süspansiyonu elde edildi. Daha sonra, her numunede mililitre başına ~4 x 10<sup>8</sup> koloni oluşturan birim (CFU/mL) yaklaşık konsantrasyona sahip 100 µL hacimde aşılınmış bir bakteri çözeltisi kullanıldı. Tüm numuneler, deneylerden yaklaşık 1 saat önce UV ışınlarıyla sterilize edilmiştir. Numuneler petri kabına yerleştirilmiş ve 37 °C'de 24 saatlik bir inkübasyon süresinden sonra, numune üzerinde canlı bakterilerin üremesiyle oluşturulan koloniler sayılarak optik görüntüler elde edilmiştir. Mililitre kültür çözeltisi başına koloni oluşturan birim (CFU) şu formülle hesaplandı:

$$CFU/mL = (\text{Koloni sayısı/plakadaki kültür kapasitesi}) \times \text{Seyreltme faktörü} \quad (1)$$

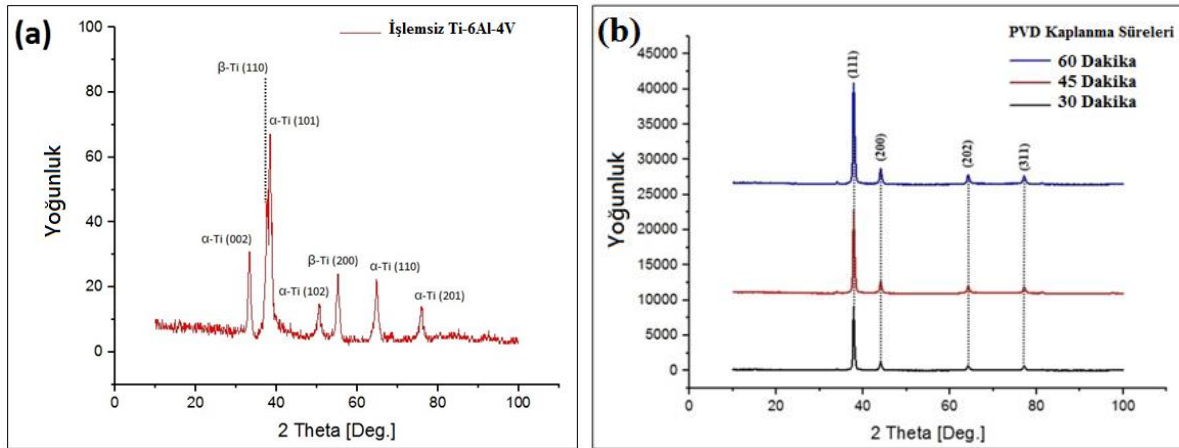
Seyreltme faktörü, seyreltme sonrası bakteri süspansiyonunun nihai hacminin, seyreltme öncesi bakteri süspansiyonu hacmine oranı olarak tanımlanmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Mikroyapı analizleri

Farklı süreler için PVD işlemi görmüş Ti6Al4V alaşımlarının XRD modellerindeki varyasyon Şekil 1'de gösterilmektedir.

XRD sonuçlarına göre, Şekil 1(a)'da gösterildiği gibi işlemsiz Ti6Al4V numunelerinin, tamamen  $\alpha$ -Ti [96-900-8518] ve  $\beta$ -Ti [96-900-8555] fazlarından oluştuğu görülmektedir. Şekil 1(b)'de, her iki numune için çeşitli sürelerde (30, 45 ve 60 dakikalık) biriktirilen Ag<sup>+</sup> filmlerin XRD grafikleri verilmiştir. XRD sonuçları, gümüş fazların [96-500-0219] (111) yönünde, ve paralel düzlemde (200), (202) ve (311) küçük katkılarla piklerin oluştuğunu göstermektedir. Gümüş tek kristalli kübik bir yapıya sahip olduğundan, nanoparçacık benzeri yapıların çoğunun, alt-tabakaya paralel kübik yüzlere sahip kristalitler aracılığıyla oluşturulduğu tahmin edilebilir (Andrade ve ark., 2013). Kaplama kalınlığı 1,6  $\mu$ m'den fazla olduğunda, tepe noktasının yoğunluğundaki pik noktasında (111) güçlü bir azalma söz konusudur. Ayrıca kaplama kalınlığı arttıkça (200), (202) ve (311) piklerin kaybolduğu da görülmektedir. Film kalınlığı arttığında, bu kristalitlerin bir birleşimi olur, ancak aynı kristal düzlemlerinde etkileşmezler. Scherrer denkleminde göre, bu çarpışmalı birleşme, kristalli bir katı için beklendiği gibi, özellikle [111] her yönde büyüyen kristalli büyük tanelere katkıda bulunur (Çomaklı ve ark., 2017). Ayrıca, Ag<sup>+</sup> kaplanmış numunelerin geniş XPS spektrumlarında Vanadyum (V) elementine ait herhangi bir pik durumuna rastlanılmamıştır. V elementinin insan vücudundaki toksik etkisini önlemede bu durum son derece önemlidir (Subramanian ve ark., 2011).



Şekil 1. XRD sonuçları: (a) işlemsiz Ti6Al4V; (c) gümüş kaplı Ti6Al4V numuneleri.

Ti6Al4V alaşımlarının yüzey pürüzlülük değerleri ve kaplama film kalınlıklarına ait değerler Çizelge 4'de gösterilmektedir.

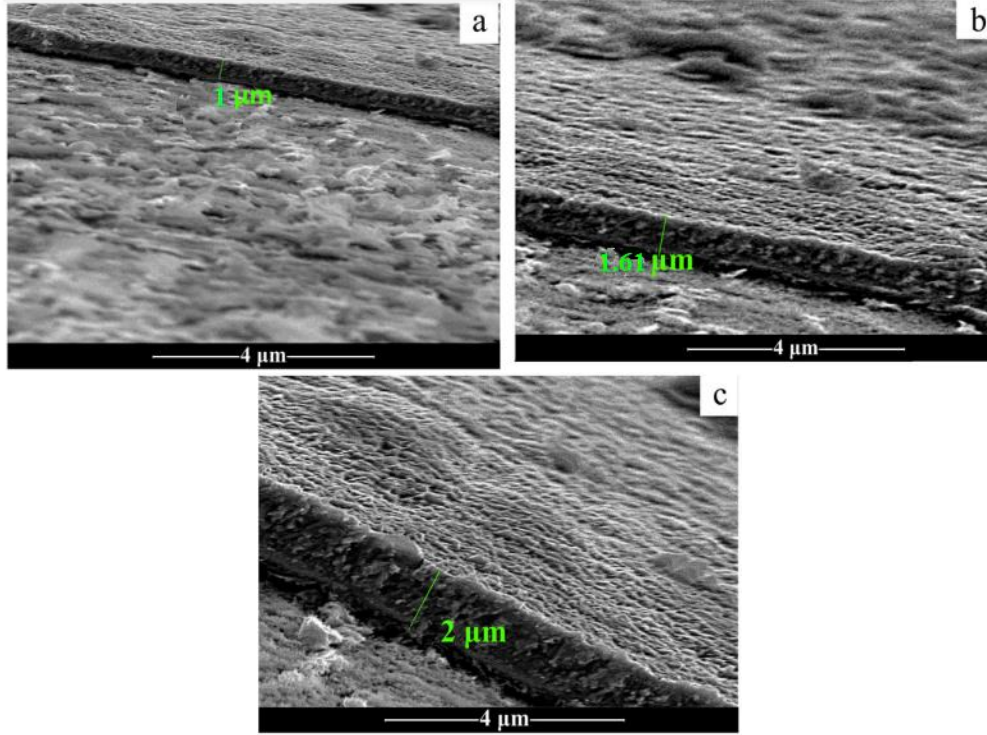
Çizelge 4. Ti6Al4V alaşımlarının yüzey pürüzlülük ve film kalınlıklarına ait değerler

Numune	İşlem Parametreleri	Film Kalınlığı ( $\mu$ m)	Yüzey Pürüzlülüğü ( $\mu$ m)
Ti6Al4V	İşlemsiz	-	0,310-0,321
	Aşındırılmış	-	2,010-2,124
	PVD 30 dk	1,00-1,10	0,212-0,224
	PVD 45 dk	1,58-1,62	0,243-0,255
	PVD 60 dk	1,92-2,07	0,276-0,289



İşlenmemiş numunelerin yüzey pürüzlülüğü  $R_a = 0.152 - 0.241 \mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. Asitle aşındırma işleminden sonra yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün artması osseointegrasyonu olumlu etkileyerek, implantın daha iyi tutunmasına neden olmaktadır. Asitle aşındırma işlemi sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülük değeri  $R_a = \sim 2 \mu\text{m}$  olduğu tespit edilmiş olup, bu değer literatür çalışmalarıyla uyumludur (Chrcanovic ve ark., 2015). PVD kaplama işleminden sonra tüm numunelerin yüzey pürüzlülüğü düşük olmuştur. Ayrıca, daha ince tane boyutları nedeniyle tüm kaplamalar arasında 30 dakikalık kaplama süresi için en düşük yüzey pürüzlülüğü gözlemlenmiştir.

Üç farklı zaman aralığında kaplanan Ti6Al4V taban malzeme üzerine yüzey topografyası, kaplamalara kalınlıkları belirlenmesi için SEM kesit görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir.



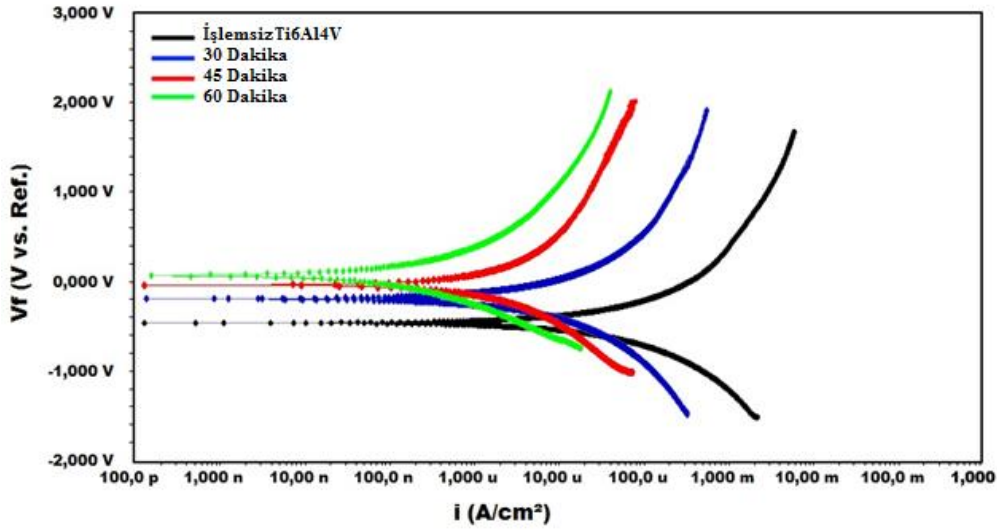
Şekil 2. Gümüş kaplı Ti6Al4V alaşımları için gözlemlenen kesit SEM yüzey morfolojileri: (a) PVD kaplanmış 30 dakika; (b) PVD kaplanmış 45 dakika; (c) PVD kaplanmış 60 dakika.

Yüzey morfolojileri incelendiğinde, kaplama sürelerinin artmasıyla ince film kalınlık değerleri arttığı gözlemlenmiştir. Kaplama süresindeki artışlar, numunelerin yüzeyinde daha kompakt (sıkışmış, yoğun) morfolojik yapı oluşmasına neden olmuştur. Bu durum, daha uzun bir kaplama süresinin sonunda sıcaklıkta adatom hareketliliğini artıran bir artışa neden olduğu yüzey difüzyon etkisine atfedilebilir. Ayrıca, gümüş filmlerin nano sütunlu büyümesi, artan film kalınlığı ile bükülme eğilimindedir (Phae-ngam ve ark., 2021). PVD kaplama işlemi süresince numunelere sürekli gerilim uygulanması nedeniyle incelenen numunelerin tüm yüzey bölgelerinin homojen şekilde kaplandığı açık şekilde görülmektedir. Hedef malzemeden sıçratılan gümüş iyonları numunelerin yüzeylerine yüksek hızlarda her yönden (tek yöne bağımlı olmadan) implante edilmiştir. Bu durum PVD kaplama işleminin temel prensibi ile uyumludur.

### 3.2. Elektrokimyasal korozyon deneyleri

Ti6Al4V alaşımları için kaydedilen polarizasyon eğrileri Şekil 3’de sunulmuştur.

OCP değerlerine göre daha düşük bir değerden tarama yapılarak polarizasyon analizleri yapılmıştır. Korozyon potansiyeli ( $E_{\text{corr}}$ ), korozyon akım yoğunluğu ( $I_{\text{corr}}$ ) ve korozyon hızı ( $mpy$ ) gibi korozyon parametreleri Çizelge 5’te gösterilmiştir.



Şekil 3. İşlemsiz ve farklı sürelerde gümüş film kaplı Ti6Al4V numunelerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

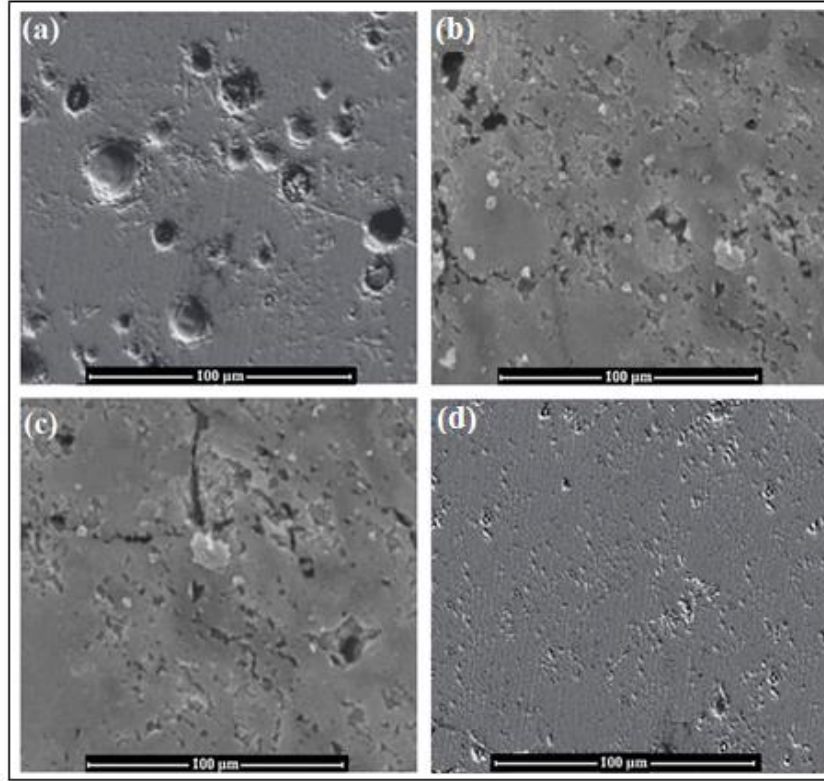
Çizelge 5. İşlemsiz ve farklı sürelerde gümüş film kaplı Ti6Al4V numunelerine ait korozyon testi sonuçları

İşlem Parametreleri	$E_{corr}$	$I_{corr}$	Korozyon Oranı (mpy)
İşlemsiz	-410 mV	$2 \times 10^{-6}$ nA	0.209
PVD 30 dakika	-201 mV	$635 \times 10^{-9}$ nA	0.062
PVD 45 dakika	-20 mV	$476 \times 10^{-9}$ nA	0.055
PVD 60 dakika	62 mV	$205 \times 10^{-9}$ nA	0.041

İşlem görmemiş Ti6Al4V numunelerinin korozyon potansiyeli ( $E_{corr}$ ) değeri -410 mV bulunmuştur. Polarizasyon eğrileri değerlendirildiğinde, gümüş film kaplı numunelerin korozyon özelliklerinde önemli bir gelişme görülmektedir. Gümüş film kaplamalı Ti6Al4V numuneleri için  $E_{corr}$  değerleri sırasıyla -201 mV (30 dakika), -20 mV (45 dakika) ve 62 mV (60 dakika) olarak ölçülmüştür. Ti6Al4V numuneleri, yüzeylerinde doğal bir oksit tabakası ile iyi bir korozyon direncine sahiptir ve  $E_{corr}$  değerinin gelişmesi, gümüş film kaplanmış numunelerin korozyon mukavemetindeki artışı göstermiştir. Bu durum gümüş film kaplamanın alaşımın çözünme hızını azalttığını ve daha kararlı bir pasif alana sahip olduğunu da göstermektedir.

Korozyon davranışını iyi anlamak için bir diğer önemli parametre de korozyon akım yoğunluğu ( $I_{corr}$ ) değeridir. Gümüş film kaplamalı Ti6Al4V numuneleri için  $I_{corr}$  değerleri sırasıyla  $635 \times 10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup> (30 dakika),  $476 \times 10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup> (45 dakika) ve  $205 \times 10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup> (60 dakika) olarak ölçülmüştür ki bu değer işlem görmemiş numuneye kıyasla ( $2, \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>) daha düşüktür. Kaplama işleminden sonra, eğrilerin anodik kısmı daha düşük  $I_{corr}$ 'a taşındı. Bu, anodik reaksiyonların kaplama işlemi ile sınırlandırıldığı ve titanyum için daha yüksek kimyasal stabilite ve koruma sağlandığı anlamına gelir (Hongxi ve ark., 2012). Ayrıca  $I_{corr}$  değerlerindeki gümüş film etkisi ile pozitif iyileşmesi bize göstermiştir ki kaplama kalınlığı arttıkça yüzeydeki oluşan gözeneklerinin çaplarının düşmesine neden olmaktadır. Kaplama kalınlığının uygun koşullarda artması ve numune üzerinde gözeneklerinin daha küçük olması taban malzemenin korozyon direncini arttırmaktadır (Yerokhin ve ark., 2000).

Korozyon testi sonrası numunelerin yüzey morfolojileri Şekil 4'de sunulmaktadır.

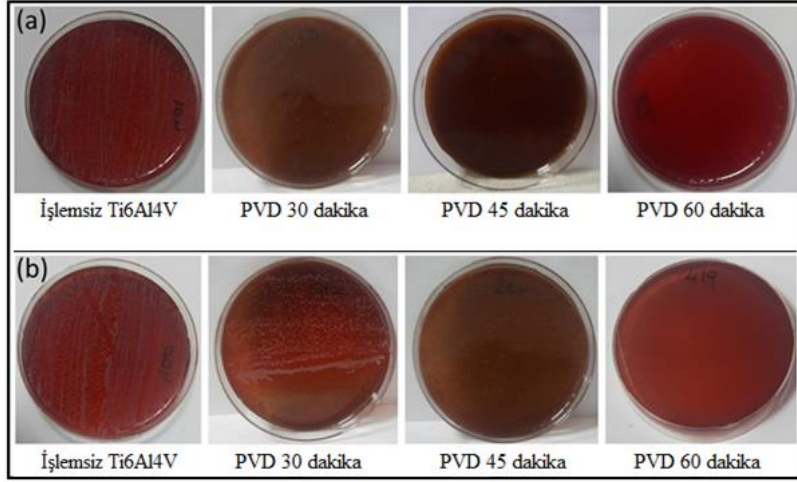


Şekil 4. Korozyon deneyi sonrası yüzey morfolojileri (a) İşlemsiz Ti6Al4V; (b) PVD 30 dakika; (c) PVD 45 dakika ; (c) PVD 60 dakika.

İşlem görmemiş Ti6Al4V (Şekil 4 (a)) numunelerde temel korozyon mekanizması lokalize korozyonun bir tipi olan çukurcuk şeklinde olduğu görülmüştür. Bu durum Ti6Al4V alaşımının düşük aşınma dayanımına sahip olması, malzemenin kolayca aşınmasına neden olması ve ortama metal iyon salınımını kolaylaştırması ile açıklanabilir. Gümüş iyon kaplamalı Ti6Al4V (Şekil 4 (b-c)) kaplama tabakasında derin çatlakların varlığı dikkat çekmektedir. Bu tür çatlakların varlığı başka çalışmalarda da tespit edilmiştir (Bakhsheshi-Rad ve ark., 2017). Ayrıca gümüş kaplama (30 dakika) yüzeylerinde oksit tabakasının (beyaz renkli) varlığı da dikkat çekmektedir. Bu durumda çatlaklara nüfuz eden SBF, alt tabaka ile doğrudan temas haline geçerek korozyon sürecini hızlandırabilir. Gümüş iyon kaplamalı (60 dakika) Ti6Al4V (Şekil 4 (d)) numunelerinin yüzeylerinin her ikisinde de neredeyse hasarsız olduğu görülmektedir. Bu durumun korozyon testleri sırasında alaşım mikroyapısı üzerinde koruyucu ve caydırıcı pasif film (gümüş oksit) tabakası ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Yetim, 2016). Asitle pürüzlendirme işlemi ile birlikte gümüş filmin oluşturduğu yapı titanyum malzemeleri üzerinde kaplama bütünlüğü sağlamıştır. Ancak bu koşullar işlemsiz numunelerde aynı değildir. Muhtemelen titanyum üzerindeki termal genişleme farklılıkları nedeniyle numune üzerinde hızlı bir şekilde deformasyon sonucu numune üzerinde dökülmelere neden olduğu düşünülmektedir.

### 3.3. Antibakteriyel test sonuçları

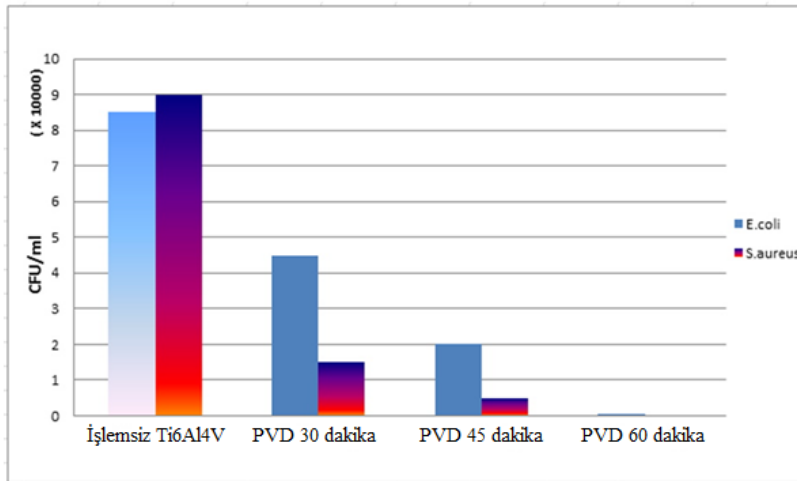
İşlem görmemiş ve gümüş film kaplı titanyum numunelerin antibakteriyel etkisini değerlendirmek için plaka sayma yöntemi kullanılmıştır. Her numunede bulunan bir dizi canlı bakteriyi gösteren optik fotoğraflar Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Yüze kolonizasyon sonuçları: (a) *E. coli*; (b) *S. aureus*; 24 saatlik sonuçlar.

Bir koloni tek bir canlı bakteriden oluşmaktadır. Şekil 5 incelendiğinde işlem görmemiş titanyum numunelerinde bakteriyel film oluşumu gözlemlendiği görülmektedir. Bu durum, işlenmemiş titanyum yüzeyinde çok sayıda görünür bakteri olduğu anlamına gelir. Diğer taraftan, gümüş film kaplı titanyum numunesi yüzeylerinde, *E. coli* ve *S. aureus* bakterilerinin büyümesinde azalma görülmektedir. Antibakteriyel test sonuçlarına göre, PVD gümüş kaplama süresinin artmasıyla bakteri kolonileri giderek azaldığı tespit edilmiştir. İnkübasyon sırasında PVD gümüş kaplama (1µm) tabakasının bozulmasının gümüş iyonunun bakteriyel çözeltiliye sızmasına izin vererek gerçekleşebileceği söylenebilir. Ancak artan film kalınlığı ile daha düzgün ve uyumlu kaplama elde edilmiş ve bunun sonucunda bakteriler titanyum yüzeyine ulaşamadığı için daha iyi antibakteriyel sonuçlar elde edilmiştir (Brobbe ve ark., 2019).

Her numune için hesaplanan CFU/mL değeri Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Ti6Al4V yüzeyinin *S. aureus* ve *E. coli*'ye karşı antibakteriyel özelliğinin kantitatif sonuçları (CFU/mL cinsinden).

Şekil 6 incelendiğinde, işlem görmemiş titanyum numuneleri yüzeylerinde oldukça fazla koloni sayısı görülmektedir. Diğer taraftan, gümüş film kaplı titanyum numunelerinde ise bakteri kolonilerinin sayısının azaldığı görülmektedir. Şekil 6'ya göre, gümüş kaplı Ti6Al4V yüzeyinin *E. coli* bakteri büyümesinin baskılama yeteneği *S. aureus*'tan daha az etkili olduğu görülmektedir. Bu durumun, gümüş iyonunun reaksiyona girmesi için geniş bir yüzey alanı sağlayan *S. aureus*'un küresel formuyla ilişkili olduğu düşünülmektedir (Zhu ve ark., 2015). Antibakteriyel sonuçlara göre gümüşün iyi bir antibakteriyel özelliğe sahip olmasının arkasında iki ana neden vardır. Birinci neden, dış hücre duvarı ile temas eden, reaktif oksijen türleri yardımıyla oksidatif strese neden olan ve ardından hücre



zarını tahrip eden gümüş iyonunun rolüdür (Chernousova & Epple, 2013). Zarlar parçalandığında, gümüş iyonu sitoplazmaya girer ve hücre içi yapıları ortadan kaldırır. İkinci neden, gümüş kaplı Ti6Al4V yüzeyinde bulunan bakteri hücreleri ve gümüş nanoparçacıkları arasındaki doğrudan fiziksel temasıdır. Bu doğrudan temas, bakterilerdeki hücre duvarlarının gerilmesine ve hasar görmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Bu sonuçların analizi, PVD gümüş kaplı numunelerin bakteri üremesinde bir azalma sağladığı sonucuna varılmasını sağlar. PVD 60 dakikalık gümüş kaplanmış numunenin bakterisit etkisi, seyreltmede hiçbir bakteri kolonisinin bulunmaması özellikle ilginç sonuçlanmıştır. Tüm numuneler için antibakteriyel test koşulları aynı olduğundan, antimikrobiyal etkideki farklılıklar doğrudan Ag<sup>+</sup>'nın çevreye salınma süresine bağlanabilir. Gümüş iyon salımı film mikro yapısı, partikül boyutu, film kalınlığındaki dağılım, elektrolit erişiminin hedef açısı ve partikül çözünmesi parametrelerden etkilenir. Özellikle, yüzey oluşturan agregalarda zaman içinde gümüşün ayrılması, antibakteriyel etkinin nicel olarak tahmin edilmesi için son derece önemlidir. Bununla birlikte, *E. coli* ve *S.aureus* ile enfeksiyonun önlenmesi için gümüş iyon salımının pozitif bir tepkisi tüm vakalarda kanıtlanmıştır, ancak 45 dakikanın üzerinde kaplamanın gösterdiği sitotoksik etkiler göz önüne alındığında (Mihăilescu ve ark., 2016), gümüş dopingi bu eşğin altında sınırlandırılmalıdır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, dental implant yapımında kullanılan Ti6Al4V alaşımından hazırlanan numunelerin yüzeylerinde, gümüş hedef malzeme kullanılarak, PVD yöntemi ile farklı sürelerde kaplamalar elde edilmiştir. Buna göre;

- Kaplamasız numune yüzeylerinde  $\alpha$ -Ti ve  $\beta$ -Ti faz pikleri görülürken, kaplama işleminden sonra numunelerde sadece Ag pikleri tespit edilmiştir. XRD sonuçlarına göre numunelerin yüzeylerindeki tabakaların homojenliği, SEM analiziyle elde edilen kesit morfolojileri ile de desteklenmiştir. Ayrıca, gümüş ile kaplanmış kaplanmamış numunelere kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahiptir ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 30 dakika boyunca biriktirilen gümüşten elde edilmiştir.
- Potansiyodinamik polarizasyon test sonuçları, gümüş kaplamadan sonra korozyon direncinin arttığını göstermektedir. Bu durumun korozyon testleri sırasında alaşım mikroyapısı üzerinde koruyucu ve caydırıcı pasif film (Ag oksit) ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. İşlem süresi arttıkça korozyon direnci arttığı, en iyi korozyon özelliklerinin 60 dakika gümüş film ile kaplanmış numune için elde edildiği görülmektedir.
- In vitro anti-bakteriyel etkinlik deneyleri sonucunda, PVD ile kaplanmış numunelerde *E. Coli* ve *S.Aureus* mikroorganizmalarının tutunumu, kaplanmamış numuneye göre daha az çıkmıştır. Bu durum, PVD yöntemi ile elde edilen kaplamaların bakteri tutunumunu azaltması, dolayısıyla anti-bakteriyellik yönünden uygun olduğunu göstermiştir. Ancak, 45 dakikanın üzerinde kaplamanın yapısı, partikül boyutu, film kalınlığındaki dağılım, elektrolit erişiminin hedef açısı ve partikül çözünmesi parametreler ve sitotoksik etkiler göz önüne alındığında, kaplama süresi bu eşğin altında sınırlandırılmalıdır.

#### Teşekkür

Bu çalışma FDK-2019-7393 kodlu proje kapsamında Atatürk Üniversitesi BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) tarafından desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- Andrade, J. E. D., Machado, R., Macêdo, M. A., & Cunha, F. G. C. (2013). AFM and XRD characterization of silver nanoparticles films deposited on the surface of DGEBA epoxy resin by ion sputtering. *Polímeros*, 23(1), 19-23. doi:10.1590/S0104-14282013005000009
- Bakhsheshi-Rad, H. R., Hamzah, E., Ismail, A. F., Aziz, M., Kasiri-Asgarani, M., Akbari, E., ... & Hadisi, Z. (2017). Synthesis of a novel nanostructured zinc oxide/baghdadite coating on Mg alloy

- for biomedical application: In-vitro degradation behavior and antibacterial activities. *Ceramics International*, 43(17), 14842-14850. doi:10.1016/j.ceramint.2017.07.233
- Brobbe, K. J., Haapanen, J., Mäkelä, J. M., Gunell, M., Eerola, E., Rosqvist, E., ... & Toivakka, M. (2019). Effect of plasma coating on antibacterial activity of silver nanoparticles. *Thin Solid Films*, 672, 75-82. doi:10.1016/j.tsf.2018.12.049
- Chrcanovic, B. R., Wennerberg, A., & Martins, M. D. (2015). Influence of temperature and acid etching time on the superficial characteristics of Ti. *Materials Research*, 18, 963-970. doi:10.1590/1516-1439.014115
- Chernousova, S., & Epple, M. (2013). Silver as antibacterial agent: ion, nanoparticle, and metal. *Angewandte Chemie International Edition*, 52(6), 1636-1653. doi:10.1002/anie.201205923
- Çomaklı, O., Yazıcı, M., Yetim, T., Yetim, A. F., & Çelik, A. (2017). The effects of aging time on the structural and electrochemical properties of composite coatings on Cp-Ti substrate. *Journal of Bionic Engineering*, 14(3), 532-539. doi:10.1016/S1672-6529(16)60419-5
- Del Re, M., Gouttebaron, R., Dauchot, J. P., Leclere, P., Lazzaroni, R., Wautelet, M., & Hecq, M. (2002). Growth and morphology of magnetron sputter deposited silver films. *Surface and Coatings Technology*, 151, 86-90. doi:10.1016/S0257-8972(01)01592-4
- Elias, C. N., Lima, J. H. C., Valiev, R., & Meyers, M. A. (2008). Biomedical applications of titanium and its alloys. *Jom*, 60(3), 46-49. doi:10.1007/s11837-008-0031-1
- Franci, G., Falanga, A., Galdiero, S., Palomba, L., Rai, M., Morelli, G., & Galdiero, M. (2015). Silver nanoparticles as potential antibacterial agents. *Molecules*, 20(5), 8856-8874. doi:10.3390/molecules20058856
- Hongxi, L., Qian, X., Xiaowei, Z., Chuanqi, W., & Baoyin, T. (2012). Wear and corrosion behaviors of Ti6Al4V alloy biomedical materials by silver plasma immersion ion implantation process. *Thin Solid Films*, 521, 89-93. doi:10.1016/j.tsf.2012.02.046
- Injeti, V. S. Y., Nune, K. C., Reyes, E., Yue, G., Li, S. J., & Misra, R. D. K. (2019). A comparative study on the tribological behavior of Ti-6Al-4V and Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloys in simulated body fluid. *Materials Technology*, 34(5), 270-284. doi:10.1080/10667857.2018.1550138
- Kokubo, T., & Takadama, H. (2006). How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity?. *Biomaterials*, 27(15), 2907-2915. doi:10.1016/j.biomaterials.2006.01.017
- Licausi, M. P., Muñoz, A. I., & Borrás, V. A. (2013). Influence of the fabrication process and fluoride content on the tribocorrosion behaviour of Ti6Al4V biomedical alloy in artificial saliva. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 20, 137-148. doi:10.1016/j.jmbbm.2013.01.019
- Liu, H., Yang, J., Zhao, X., Sheng, Y., Li, W., Chang, C. L., ... & Wang, X. (2019). Microstructure, mechanical properties and corrosion behaviors of biomedical Ti-Zr-Mo-xMn alloys for dental application. *Corrosion Science*, 161, 108195. doi:10.1016/j.corsci.2019.108195
- Mao, C., Xiang, Y., Liu, X., Cui, Z., Yang, X., Yeung, K. W. K., ... & Wu, S. (2017). Photo-inspired antibacterial activity and wound healing acceleration by hydrogel embedded with Ag/Ag@AgCl/ZnO nanostructures. *ACS Nano*, 11(9), 9010-9021. doi:10.1021/acs.nano.7b03513
- Mihailescu, I. N., Bociaga, D., Socol, G., Stan, G. E., Chifiriuc, M. C., Bleotu, C., ... & Miculescu, F. (2016). Fabrication of antimicrobial silver-doped carbon structures by combinatorial pulsed laser deposition. *International Journal of Pharmaceutics*, 515(1-2), 592-606. doi:10.1016/j.ijpharm.2016.10.041
- Patil, D., Wasson, M. K., Aravindan, S., Vivekanandan, P., & Rao, P. V. (2019). Antibacterial and cytocompatibility study of modified Ti6Al4V surfaces through thermal annealing. *Materials Science and Engineering: C*, 99, 1007-1020. doi:10.1016/j.msec.2019.02.058
- Phae-ngam, W., Chananonawathorn, C., Lertvanithphol, T., Samransuksamer, B., Horprathum, M., & Chaikyakun, T. (2021). Effect of deposition time on nanocolumnar TiZrN films grown by reactive magnetron co-sputtering with the OAD technique. *Materials and Technology*, 55(1), 65-70. doi:10.17222/mit.2019.189
- Stuart, B. W., Stan, G. E., Popa, A. C., Carrington, M. J., Zgura, I., Neculescu, M., & Grant, D. M. (2022). New solutions for combatting implant bacterial infection based on silver nano-dispersed and gallium incorporated phosphate bioactive glass sputtered films: A preliminary study. *Bioactive Materials*, 8, 325-340. doi:10.1016/j.bioactmat.2021.05.055
- Subramanian, B., Ananthakumar, R., & Jayachandran, M. (2011). Structural and tribological properties of DC reactive magnetron sputtered titanium/titanium nitride (Ti/TiN) multilayered



- coatings. *Surface and Coatings Technology*, 205(11), 3485-3492. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.12.016
- Taddei, E. B., Henriques, V. A. R., Silva, C. R. M., & Cairo, C. A. A. (2004). Production of new titanium alloy for orthopedic implants. *Materials Science and Engineering: C*, 24(5), 683-687. doi:10.1016/j.msec.2004.08.011
- Taglietti, A., Arciola, C. R., D'Agostino, A., Dacarro, G., Montanaro, L., Campoccia, D., ... & Visai, L. (2014). Antibiofilm activity of a monolayer of silver nanoparticles anchored to an amino-silanized glass surface. *Biomaterials*, 35(6), 1779-1788. doi:10.1016/j.biomaterials.2013.11.047
- Yanovska, A. A., Stanislavov, A. S., Sukhodub, L. B., Kuznetsov, V. N., Illiashenko, V. Y., Danilchenko, S. N., & Sukhodub, L. F. (2014). Silver-doped hydroxyapatite coatings formed on Ti-6Al-4V substrates and their characterization. *Materials Science and Engineering: C*, 36, 215-220. doi:10.1016/j.msec.2013.12.011
- Vasilev, K., Cook, J., & Griesser, H. J. (2009). Antibacterial surfaces for biomedical devices. *Expert Review of Medical Devices*, 6(5), 553-567. doi:10.1586/erd.09.36
- Ye, S. H., Johnson Jr, C. A., Woolley, J. R., Oh, H. I., Gamble, L. J., Ishihara, K., & Wagner, W. R. (2009). Surface modification of a titanium alloy with a phospholipid polymer prepared by a plasma-induced grafting technique to improve surface thromboresistance. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 74(1), 96-102. doi:10.1016/j.colsurfb.2009.06.032
- Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., & Matthews, A. (2000). Characterisation of oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti-6Al-4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 130(2-3), 195-206. doi:10.1016/S0257-8972(00)00719-2
- Yetim, T. (2016). Corrosion behavior of Ag-doped TiO<sub>2</sub> coatings on commercially pure titanium in simulated body fluid solution. *Journal of Bionic Engineering*, 13(3), 397-405. doi:10.1016/S1672-6529(16)60311-6
- Zhu, Y., Cao, H., Qiao, S., Wang, M., Gu, Y., Luo, H., ... & Lai, H. (2015). Hierarchical micro/nanostructured titanium with balanced actions to bacterial and mammalian cells for dental implants. *International Journal of Nanomedicine*, 10(1), 6659. doi:10.2147%2FIJN.S92110



Research Article

**Investigation of Thermal Insulation Performance at Different Coating Thicknesses by Using Finite Volume Method**

**Bahadır Erman YÜCE\***, **Serkan ÖZEL**

Bitlis Eren University, Faculty of Engineering and Architecture, Mechanical Engineering Department, 13100, Bitlis, Türkiye

Bahadır Erman YÜCE, [ORCID No: 0000-0002-2432-964X](https://orcid.org/0000-0002-2432-964X), Serkan ÖZEL, [ORCID No: 0000-0003-0700-1295](https://orcid.org/0000-0003-0700-1295)

\*Corresponding author e-mail: beyuce@beu.edu.tr

**Article Info**

Received: 31.10.2022  
Accepted: 08.02.2023  
Online August 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1196361](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1196361)

**Keywords**

Coating,  
FVM,  
Thermal analysis

**Abstract:** In this study, the effect of coating thickness and thermal property on the temperature distribution of an internal combustion diesel piston was investigated numerically. A piston was modelled in three-dimensional, and then a grid independency test was performed. The optimum element number was selected without losing computational accuracy. The thickness values were considered as 250, 500, and 750  $\mu\text{m}$ . Tungsten Carbide (WC) and Zirconia ( $\text{ZrO}_2$ ) were used as coating material. Convective heat loads were applied as boundary conditions. Temperature values in different locations were used to evaluate the thermal performance of the coating layer. The numerical results showed that WC doesn't have a significant effect by the mean of thermal insulation and WC-coated piston top surface temperature is like uncoated temperature even with the higher thickness values. However,  $\text{ZrO}_2$  has a better performance as thermal insulation material, and its effectiveness increases with higher thickness values.

**Farklı Kaplama Kalınlıklarında Isıl Yalıtım Performansın Sonlu Hacim Metodu ile İncelenmesi**

**Makale Bilgileri**

Geliş: 31.10.2022  
Kabul: 08.02.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1196361](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1196361)

**Anahtar Kelimeler**

Isıl analiz,  
Kaplama,  
SHA

**Öz:** Bu çalışmada, kaplama kalınlığının ve ısıl özelliğinin, içten yanmalı bir dizel motor pistonunun sıcaklık dağılımına olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Piston üç boyutlu olarak modellenmiş ve ardından ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Hesaplama hassasiyetini düşürmeden, en uygun eleman sayısı seçilmiştir. 250, 500 ve 750  $\mu\text{m}$  olmak üzere üç farklı kaplama kalınlığı çalışılmıştır. Kaplama malzemesi olarak ise Tungsten Karbür (WC) ve Zirkonya ( $\text{ZrO}_2$ ) kullanılmıştır. Sınır şartları olarak taşınım ısıl yükleri uygulanmıştır. Kaplama tabakasının ısıl performansını değerlendirmek için farklı konumlardaki sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar göstermiştir ki, WC kaplamasının ısıl yalıtım üzerinde kayda değer bir etkisi yoktur ve kaplama yüzeyinin üzerindeki sıcaklık değerleri farklı kaplama kalınlıklarında bile kaplama yapılmayan piston ile aynıdır. Fakat,  $\text{ZrO}_2$  ısıl yalıtım malzemesi olarak çok daha iyi bir performansa sahiptir ve bu durum artan kalınlık değerleri ile artmaktadır.

## 1. Introduction

The efficient use of fuels is very important today due to the increasing energy demand and costs. In addition, the efficient use of fuels is crucial in terms of reducing emission rates. Thermal losses in internal combustion engines are an engineering problem and directly affect efficiency. Similarly, thermal losses are a critical problem in diesel engine pistons. These losses cause decreases in fuel efficiency and increases in emission rates (Ramasamy et al., 2021; Wang et al., 2021).

To reduce thermal losses in diesel engine pistons, a coating process is carried out. The pistons are covered with a material with a lower thermal conductivity coefficient than the piston material and the amount of heat transferred from the combustion chamber to the piston is reduced. The coating on the piston is therefore also called the thermal barrier coating (TBC) (Vural, 2015). TBC materials decrease the piston surface temperatures while insulating the heat transfer that occurred from the combustion reaction. This effect, results to decrease heat transfer losses and an increases in the in-cylinder temperature (Aydin et al., 2015; Powell et al., 2017).

Many experimental and numerical studies have been conducted on the thermal performance and effects of TBCs. Coated diesel engine piston (Buyukkaya & Cerit, 2007; Cerit, 2011; Cerit & Coban, 2014; Gehlot & Tripathi, 2016; Baldissera & Delprete, 2018; Dhinesh et al., 2018; Wang et al., 2021; Gok & Karabas, 2022) and cylinder (Shen et al., 2012) are also investigated as different applications. Wang et al. (2021) investigated the effects of TBC material parameters like specific heat capacity, thermal conductivity, and porosity within reasonable ranges on engine combustion and emissions. Gok & Karabas (2022) stated that they obtained a lower thermal conductivity value by doping LZ with Gd and Yb and coating them on a metal substrate by plasma spraying method to obtain single and double-layered TBCs. They simulated the thermal insulation and surface temperatures on the produced coating on a diesel engine piston with the finite element method. Gehlot & Tripathi (2016) investigated the steady-state thermal analysis of a diesel engine piston coated with a ceramic coating having holes on its surface. They compared the coating which has holes with, having no holes then found a significant increase in the piston top surface temperature occurs with the coating having holes.

There is a limited number of studies that investigate the thermal barrier performance of coating materials on internal combustion engine pistons numerically. We investigated and compared different temperature values from different locations on the piston and coating layer. In addition, we considered the thickness of the coating layer and different materials. In addition, a grid-independent solution is presented in detail. In this study, the effect of 250, 500, and 750  $\mu\text{m}$  WC and ZrO<sub>2</sub> coating layer on the diesel engine piston thermal performance was investigated numerically under steady-state conditions. Piston surface temperature values are considered as performance criteria and results were compared with each other and an uncoated piston.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Geometry and modelling

A diesel engine piston was modelled in 3D and the dimensions of the model are shown in Figure 1. The model contains fundamental geometric characteristics of a diesel engine piston. The coated piston geometry has an extra body on the piston which represents coating materials. Three different coating thicknesses (250  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , and 750  $\mu\text{m}$ ) were investigated.

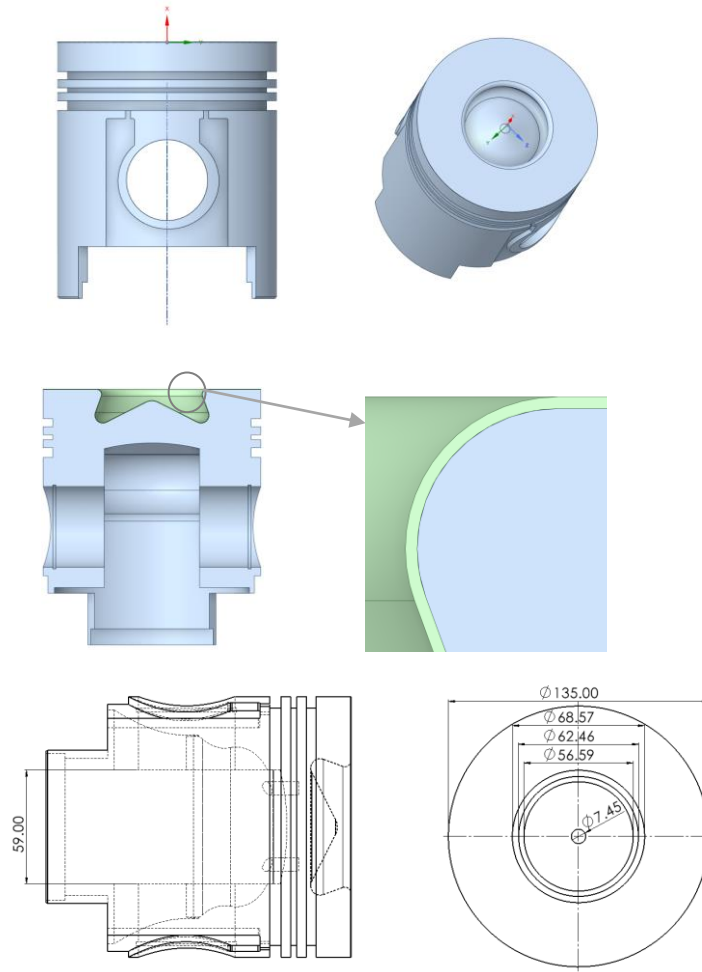


Figure 1. 3D model of the piston and dimensions.

## 2.2. Grid independence

Grid independence study is critical for computational studies to show that the results are consistent and independent of the element numbers. It is also important to use computational sources efficiently. In this study, three different element numbers were tested to obtain grid independence: 323 399, 797 994, and 969 609. The uncoated piston coated was used for the grid independence study. The comparison of the results was shown in Figure 2. All grids have similar performance but 797 994, and 969 609 element numbers have the same performance, so the grid has 797 994 elements number was used for further simulations to decrease the computational cost.

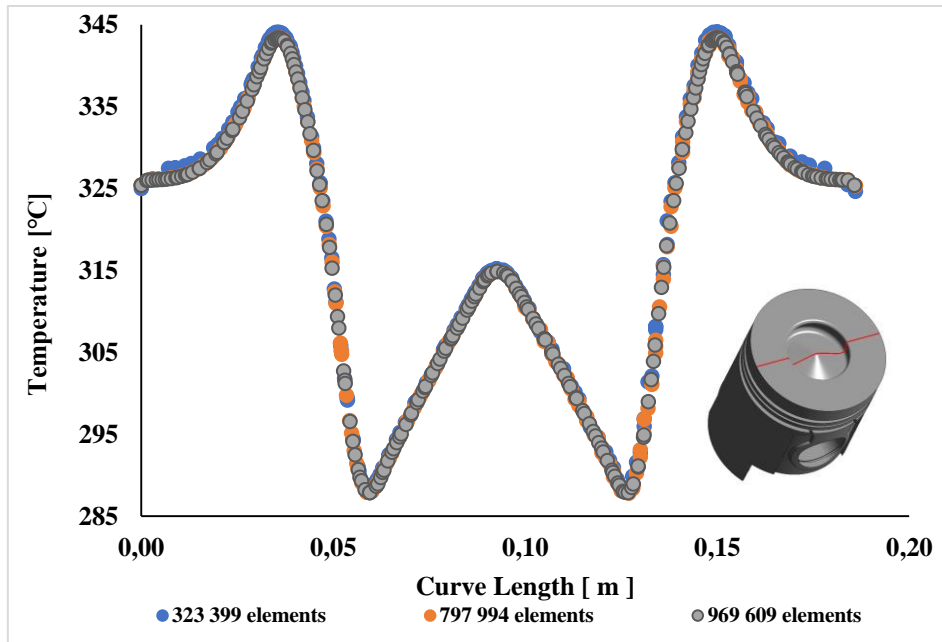


Figure 2. Comparison of different element numbers.

### 2.3. Boundary conditions

Seven numerical simulations were performed with four different geometries according to the coating situation and thickness values.  $ZrO_2$  and WC were used for coating materials. Simulations were performed in steady-state conditions. The piston material is considered as AlSi and the thermal conductivity coefficient of AlSi is  $155 \text{ W mK}^{-1}$ . The thermal conductivity coefficient of WC and  $ZrO_2$  were also set as  $96 \text{ W mK}^{-1}$  and  $2.7 \text{ W mK}^{-1}$  respectively. The melting point of the WC is  $2870^\circ\text{C}$ , and it has a high abrasion resistance. Although the thermal conductivity coefficient is close to the AlSi alloy, which is the piston material, it can provide a surface resistant to abrasion and thermal deformation on the piston surface. These properties of the material are the main motivation to investigate the thermal insulation behavior.

Thermal loads on the piston surface were modelled as convection heat transfer and these surfaces are shown in Figure 3. The heat transfer coefficients and ambient temperatures are  $800 \text{ W m}^2\text{K}^{-1}$ - $600^\circ\text{C}$  (Figure 3a),  $230 \text{ W m}^2\text{K}^{-1}$ - $300^\circ\text{C}$  (Figure 3b),  $200 \text{ W m}^2\text{K}^{-1}$ - $160^\circ\text{C}$  (Figure 3c) and  $1500 \text{ W m}^2\text{K}^{-1}$ - $110^\circ\text{C}$  (Figure 4a) (Vural, 2015). ANSYS Fluent was used as the simulation program. Converge criteria was set as  $10^{-15}$ .

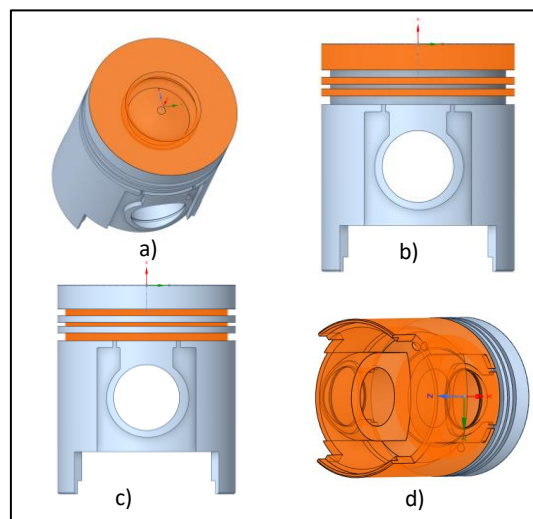


Figure 3. Surfaces in which convection boundary conditions are applied.

## 2.4. Plasma spray coating

Plasma spray coating is a method applied for coatings with very high melting points. In the plasma torch, an electric arc occurs between the anode and cathode. This arc ionizes the pressurized inert gas (such as argon, helium, nitrogen, hydrogen) used as plasma gas, resulting in the formation of plasma at high temperatures. A plasma of approximately 15,000 K temperature can be created at the center of the plasma arc. The coating powder is fed into the plasma, either from a very close nozzle exit point or from the inside. This process ensures that the powder reaches the hottest part of the plasma. The thermal energy of the plasma melts the powders, and the molten powders are propelled onto the substrate by the increased pressure in the nozzle, resulting in the coating (Özel, 2009).

## 3. Results

In this study, the thermal loads affecting a diesel piston were investigated both on an uncoated piston, and with two coated pistons with different coating thicknesses. WC and ZrO<sub>2</sub> were investigated as coating materials. These two coating materials have thermal conductivity coefficients of 95 and 2.7 W mK<sup>-1</sup> that providing a wide comparison range to see the effect of the thermal conductivity coefficient.

The temperature distribution on the uncoated piston surface is shown in Figure 4. The maximum temperature on the piston is 343.4 °C and the minimum temperature is 110.5 °C as expected. The reason for this is that the lowest environmental temperature in the convective heat transfer boundary condition is defined in the bottom and interior of the piston. The piston combustion chamber surface temperature is not homogeneous, and it can be seen clearly in Figure 4b which has a local colour scale. The highest temperature in the piston combustion chamber is 343.4 °C and the lowest temperature is 283.1 °C. The highest temperature in the piston combustion chamber is in the middle point.

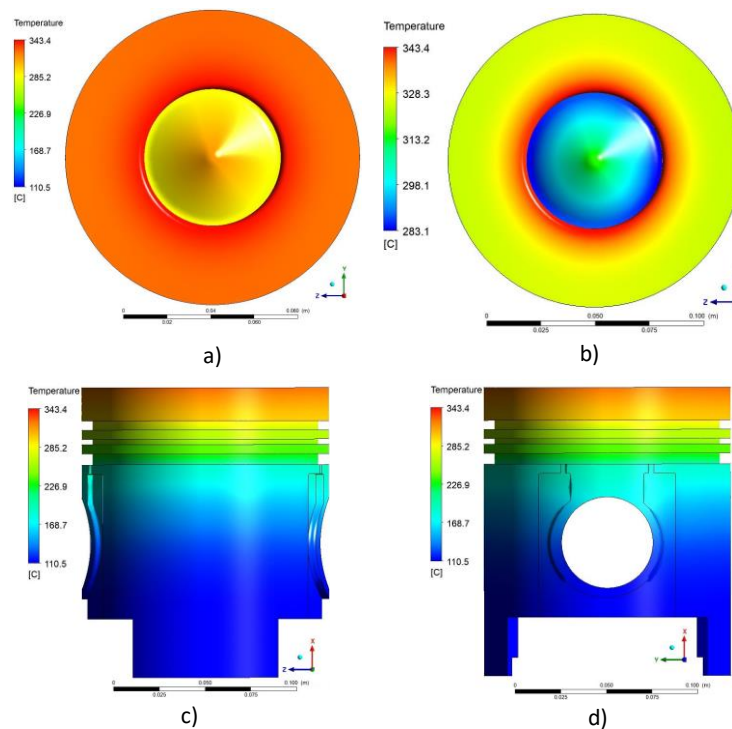


Figure 4. Temperature distribution on the surfaces of the uncoated piston (a,c,d is coloured with the global temperature scale and, b is coloured with the local scale).

The temperature distributions over the WC-coated pistons in different thicknesses are shown in Figure 5. The maximum temperature values on the pistons are 343.7, 343.9, and 344.1 °C respectively for coating layers that have 250, 500, and 750 µm thickness. It is observed that thickness



doesn't have a significant effect on the temperature distributions of WC-coated pistons because of the high conductivity coefficient ( $96 \text{ W mK}^{-1}$ ). The minimum temperature values are  $110.5 \text{ }^\circ\text{C}$  for all thickness values, as on the uncoated piston. The piston combustion chamber temperature distribution is also similar to the uncoated piston. The highest temperature in the combustion cell was obtained in the middle point.

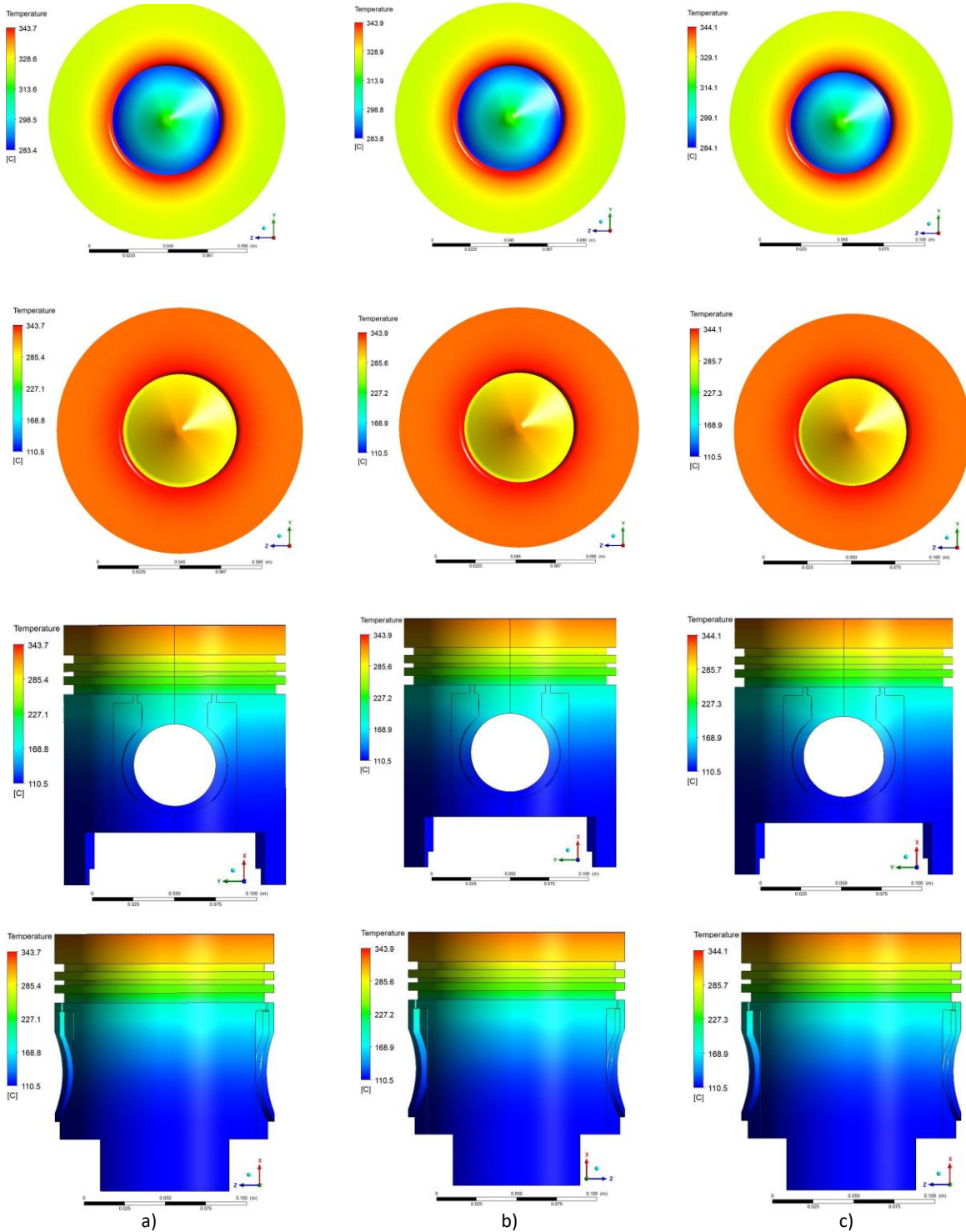


Figure 5. Temperature distribution on the surfaces of a)  $250\mu\text{m}$ , b)  $500\mu\text{m}$ , c)  $750\mu\text{m}$  WC-coated piston.

The temperature distributions over the  $ZrO_2$ -coated pistons in different thicknesses are shown in Figure 6. The maximum temperature values on the pistons are 357.2, 370.9, and 384.3 °C respectively for coating layers that have 250, 500, and 750 $\mu m$  thickness. The thermal behaviour of the  $ZrO_2$  coating layer is different from the WC coating. Surface temperatures of combustion chambers with all thickness values are higher than WC-coated pistons and different from each other. It is observed that thickness has an important effect on the temperature distributions of  $ZrO_2$ -coated pistons because of the low ( $2.7 \text{ W mK}^{-1}$ ) conductivity coefficient. The minimum temperature values are 110.5 °C for all thickness values, as on the uncoated piston and WC-coated piston. The temperature distribution in the piston combustion chamber is the same as the other pistons in terms of temperature difference. The highest temperature in the combustion cell was obtained in the middle point.

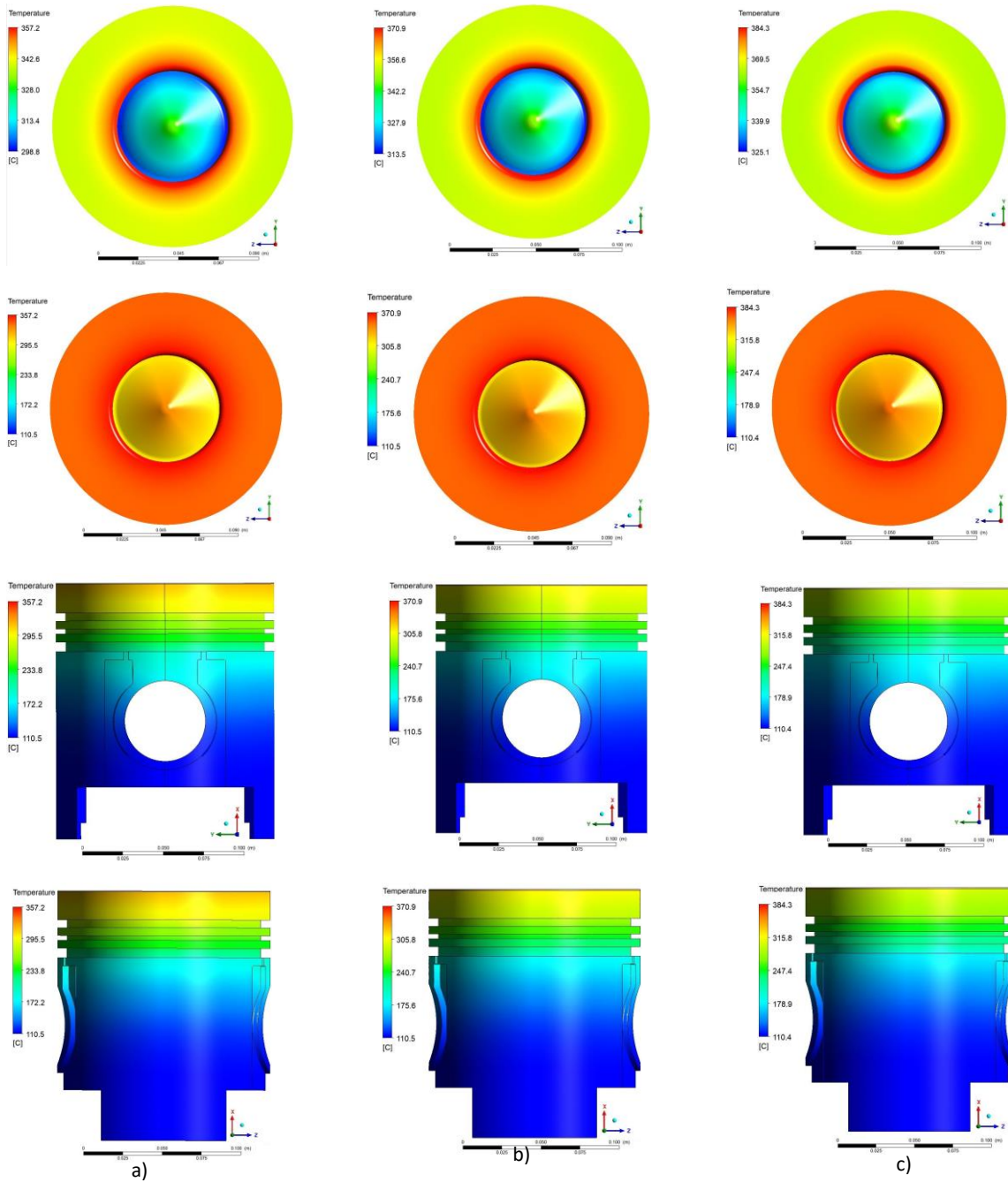


Figure 6. Temperature distribution on the surfaces of a) 250 $\mu m$ , b) 500 $\mu m$ , c) 750 $\mu m$   $ZrO_2$ -coated piston.

The top surface temperature profiles of coated pistons and uncoated piston under the same thermal loads are given in Figure 7 and this figure summarizes the temperature values on the piston top surface for all thicknesses. Materials that have low thermal conductivity coefficients have a thermal insulation effect and this effect causes a decrease in heat transfer from the ambient to the piston. As a result of this, the temperature of the top surfaces of the coated pistons increases but under the coating layer, the surface temperature decreases. The lowest temperature values on the piston surface were obtained in the uncoated piston. However, the temperature profile of WC-coated pistons is only slightly different from the uncoated pistons in the steady state conditions, even for the higher thickness values.

The surface temperature values in the  $ZrO_2$ -coated pistons are higher than the piston coated with WC and the uncoated piston. The temperature is maximum at the edge between the upper surface of the piston and the combustion chamber. The top surface temperature increases with the thickness values. Maximum temperature values were obtained at the 750  $\mu m$  coating thickness.

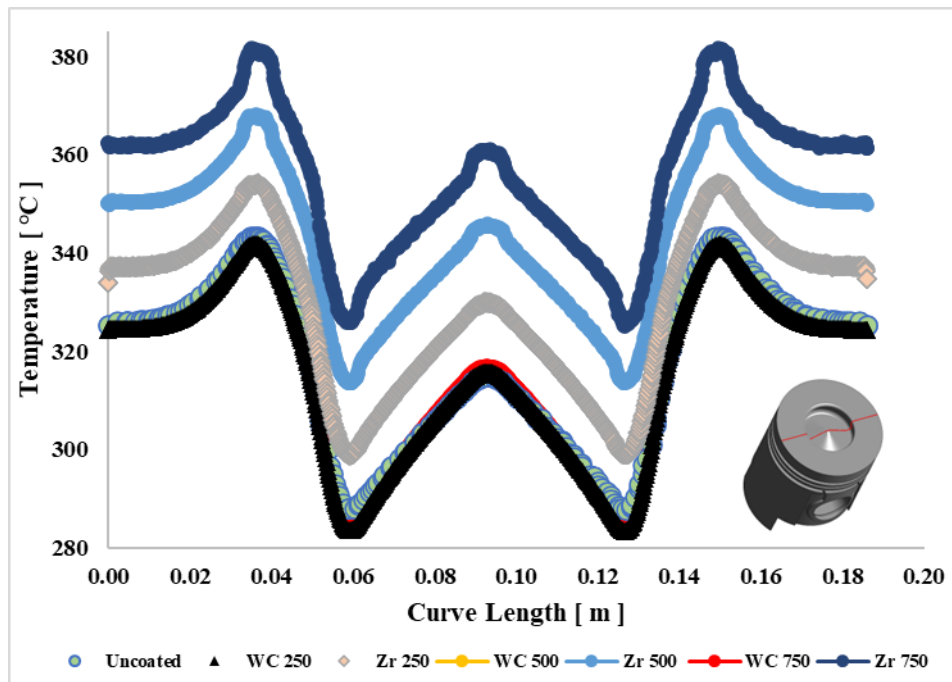


Figure 7. Temperature distributions on the top surface of the pistons.

The surface temperature profile of the uncoated piston and the temperature profiles of the coated pistons' sub-surface are shown in Figure 8. As mentioned above, the coating layer has a thermal insulation effect that decreases the heat transfer from the environment to the piston body. As a result of this effect, temperature values under the coating layer are lower than the top surface temperatures. Temperature distributions on the pistons covered with  $ZrO_2$  have the lowest temperature values and higher thicknesses improve the insulation performance according to Figure 8. The uncoated piston has the highest temperature values, and the WC-coated pistons have similar results to the uncoated piston.

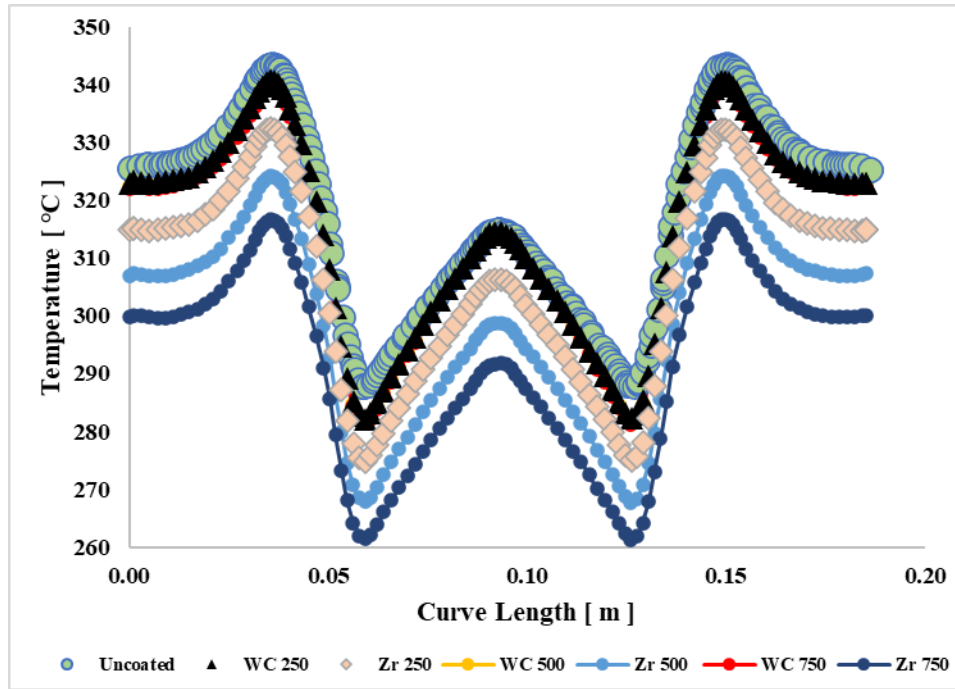


Figure 8. Temperature distributions on the sub-surface of the coating.

Temperature values at different locations on the piston and coating layer are shown in Table 1. The mean top and bottom surface temperatures of the WC coating layers are close to each other in all thickness values because of the high heat transfer rate. On the other hand, differences between the mean top and bottom surface temperatures of the ZrO<sub>2</sub> coating layer are 23.50, 44.98, and 64.69 °C for 250, 500, and 750 μm thickness values respectively. This relation also affects the maximum temperature values. The highest maximum temperature on the piston body is 342.858 at the uncoated piston and the lowest value is at the 750 μm ZrO<sub>2</sub> coated piston.

Table 1. Temperature values on the coating layer and piston

Temperature (°C)	250 μm		500 μm		750 μm	
	WC	ZrO <sub>2</sub>	WC	ZrO <sub>2</sub>	WC	ZrO <sub>2</sub>
Mean coating layer	320.486	323.669	320.409	326.475	320.327	329.024
Mean piston body	217.804	213.649	217.514	209.589	217.225	205.863
Mean coating top surface	320.953	335.439	321.344	349.006	321.729	361.445
Mean coating bottom surface	320.048	311.943	319.505	304.03	318.958	296.759
Maximum value on coating	343.671	356.08	343.874	369.71	344.046	383
Maximum value on piston	342.858	334.451	342.439	326.331	341.933	318.761
Minimum value on coating	282.761	276.509	282.366	270.197	281.962	263.712
Minimum value on piston	110.497	110.478	110.495	110.459	110.494	110.442

#### 4. Discussion and Conclusion

This study aims to investigate the temperature distributions of diesel engine pistons coated with 250, 500, and 750 μm WC and ZrO<sub>2</sub>. According to numerical results, their performance was compared with the uncoated piston. The temperature distributions on the piston surfaces, and the lower and upper surfaces of the coating layer, were calculated and compared.

It is found that, WC is not a successful thermal insulation material because of the high thermal conductivity coefficient even in high thickness values. Furthermore, the temperature distribution of the WC-coated piston is very similar to the uncoated piston. On the other hand, the thermal performance of the ZrO<sub>2</sub> coating layer is better in all thickness values. It is more successful in reducing the transfer of heat generated by the combustion reaction to the piston. It is thought that this positive effect will be effective in reducing the thermal loads on the piston, as well as increasing the combustion temperature



and reducing emissions and fuel consumption. The increase of ZrO<sub>2</sub> coating thickness increases the insulation performance but it should be noticed that this relation is not linear, and the optimum value should be investigated.

## 5. Acknowledgement

This study was presented at the Global Summit on Advanced Materials and Sustainable Energy (G-AMSE22) on 03 October 2022 and then it was submitted by being expanded for publishing to Yüzüncü Yıl University Journal of the Institute of Natural & Applied Sciences.

## References

- Aydin, S., Sayin, C., & Aydin, H. (2015). Investigation of the usability of biodiesel obtained from residual frying oil in a diesel engine with thermal barrier coating. *Applied Thermal Engineering*, 80, 212-219. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.01.061
- Baldissera, P., & Delprete, C. (2018). Finite element thermo-structural methodology for investigating diesel engine pistons with thermal barrier coating. *SAE International Journal of Engines*, 12(1), 69-78. doi:10.4271/03-12-01-0006
- Buyukkaya, E., & Cerit, M. (2007). Thermal analysis of a ceramic coating diesel engine piston using 3-D finite element method. *Surface and Coatings Technology*, 202(2), 398-402. doi:10.1016/j.surfcoat.2007.06.006
- Cerit, M. (2011). Thermo mechanical analysis of a partially ceramic coated piston used in an SI engine. *Surface and Coatings Technology*, 205(11), 3499–3505. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.12.019
- Cerit, M., & Coban, M. (2014). Temperature and thermal stress analyses of a ceramic-coated aluminum alloy piston used in a diesel engine. *International Journal of Thermal Sciences*, 77, 11-18. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.009
- Dhinesh, B., Maria Ambrose Raj, Y., Kalaiselvan, C., & KrishnaMoorthy, R. (2018). A numerical and experimental assessment of a coated diesel engine powered by high-performance nano biofuel. *Energy Conversion and Management*, 171, 815-824. doi:10.1016/j.enconman.2018.06.039
- Gehlot, R., & Tripathi, B. (2016). Thermal analysis of holes created on ceramic coating for diesel engine piston. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8, 291-299. doi:10.1016/j.csite.2016.08.008
- Gok, M. G., & Karabas, M. (2022). Production of Re doped La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> based TBCs and numerical analysis of their use on IC engine piston surface. *Ceramics International*, 48(8), 11173-11180. doi:10.1016/j.ceramint.2021.12.337
- Özel, S. (2009). *Alüminyum alaşımı ve bronzu yüzeyine oksit ve karbür bileşiklerinin plazma sprey yöntemiyle kaplanmasının araştırılması*. (PhD), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.
- Powell, T., O'Donnell, R., Hoffman, M., & Filipi, Z. (2017). Impact of a Yttria-Stabilized zirconia thermal barrier coating on HCCI engine combustion, Emissions, and Efficiency. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(11), 111504. doi:10.1115/1.4036577
- Ramasamy, N., Kalam, M. A., Varman, M., & Teoh, Y. H. (2021). Effect of thermal barrier coating on the performance and emissions of diesel engine operated with conventional diesel and palm oil biodiesel. *Coatings*, 11(6), 692. doi:10.3390/coatings11060692
- Shen, X., Nie, X., & Hu, H. (2012). Numerical analysis of thermal distributions in aluminum engine cylinders influenced by alumina ceramic coatings. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 62(6), 463-478. doi:10.1080/10407782.2012.703095
- Vural, E. (2015). Thermal analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and SiC coatings combustion of a diesel engine piston 3D finite element method. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 1(6), 20–30.
- Wang, Y., Ma, T., Liu, L., & Yao, M. (2021). Numerical investigation of the effect of thermal barrier coating on combustion and emissions in a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 186, 116497. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.116497



Research Article

## The Effect of Phase Change Temperature of Graphite Matrix Composite on Small-Scale Li-Ion Package Performance Under Square Wave Load

Mustafa Yusuf YAZICI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samsun University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, 55420, Samsun, Türkiye

<sup>2</sup>University of Nottingham, Engineering Faculty, Mechanical Eng. Department, NG7 2RD, Nottingham, UK

Mustafa Yusuf YAZICI, ORCID No: 0000-0002-1076-9265

Corresponding author e-mail: myusuf.yazici@samsun.edu.tr

### Article Info

Received: 14.09.2022

Accepted: 21.02.2023

Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1175411

### Keywords

Battery,  
Cooling,  
Graphite matrix,  
Li-ion,  
PCM,  
Thermal management

**Abstract:** An experimental study is performed to illustrate the effect of the melting temperature of graphite matrix composite with phase change materials on the performance characteristics of a small-scale li-ion package (3s2p) under dynamic/square wave load. Paraffin (RT35 and RT42) is used as a PCM. Graphite matrix is manufactured with 75 g l<sup>-1</sup> bulk density. The battery package is performed for three different configurations: free-air cooling case (reference case), and graphite matrix composites with RT35 and RT42. The experimental outputs present that graphite matrix composite has considerable potential for thermal management of the Li-ion pack. Safe operating time, discharge and energy capacity values are increased by 140%, 141% and 102% with the graphite composite with RT35 in the comparison reference case, respectively. It is observed that the melting temperature of PCM of graphite composite is of critical importance to the performance of the battery pack. For the graphite composite with RT35, operating time, discharge capacity and energy capacity values are enhanced by 6.2 %, 7 % and 10 % compared to the RT42 case, respectively.

## Grafit Matris Kompozit Faz Dönüşüm Sıcaklığının Kare Dalga Yük Altındaki Küçük Ölçekli Bir Li-iyon Batarya Paketi Performansına Etkisi

### Makale Bilgileri

Geliş: 14.09.2022

Kabul: 21.02.2023

Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1175411

### Anahtar Kelimeler

Batarya,  
FDM,  
Grafit matris,  
Li-iyon,  
Soğutma,  
Termal yönetim

**Öz:** Faz değiştiren malzeme (FDM) ilaveli kompozit grafit matris içerisindeki faz değiştiren malzeme erime sıcaklığının küçük ölçekli (3s2p) bir li-iyon paketi performansı üzerindeki etkileri dinamik-kare yük altında deneysel olarak incelenmiştir. FDM olarak parafin (RT35 ve RT42) kullanılmıştır. Grafit matris 75 g l<sup>-1</sup> yığın yoğunluğu ile üretilmiştir. Batarya paketi üç farklı konfigürasyon için test edilmiştir: doğal taşınım hava soğutma (referans durum) ve grafit kompozit-RT35 ve RT42. Deneysel çıktılar, grafit matris kompozitin li-iyon batarya paketinin termal yönetimi için önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Referans duruma kıyasla grafit matris kompozit-RT35 ile güvenli çalışma süresinde %140, deşarj ve enerji kapasitesi değerlerinde ise %141 ve %102 oranında bir artış sağlanmıştır. Grafit matris kompozit içerisindeki FDM'lerin erime sıcaklıklarının batarya paketi performansı üzerinde kritik öneme sahip olduğu gözlenmiştir. Grafit matris kompozit-RT35 için çalışma süresi, deşarj kapasitesi ve enerji kapasitesi değerleri grafit matris kompozit-RT42 durumuna kıyasla, sırasıyla, %6, %7 ve %10 artırılmıştır.



## 1. Introduction

Electromobility is a global trend to avoid the threat of energy and climate crisis, and severe environmental pollution such as air and noise leading to environmental health risks. However, the battery is the key feature for spreading electromobility including cars, bikes. Li-ion battery technology has the highest potential among other options with no-memory effect, high specific power/energy density, long life cycle, high discharge voltage, low self-discharge and stable performance in the current era. Although the li-ion cell provides a considerable solution for electromobility, the operating conditions are subject to certain restrictions. Temperature is one of the key features of li-ion performance. There are two critical conditions for temperature for li-ion technology: improper operating temperature and high non-uniformity, which cause deteriorations in performance, safety and lifetime. The operating temperature should be within the restricted range of 15 °C – 35 °C for utilizing the li-ion technology more. Moreover, it is desired that the temperature gradient between cells should be kept at less than 5 °C to avoid voltage differences. Therefore, battery thermal management system (BTMS) is a critical role in addressing thermal safety, improving performance, and extending lifetime (Liu et al., 2017; Arora, 2018; Zichen & Changqing, 2021).

BTMS with phase change phenomenon is an impressive way with superior characteristics including high heat absorption capability in lesser volume, isothermally process, simple lightweight and also with noise-free and no-additional power to make reduced carbon footprint batteries for a green environment. Nevertheless, low thermal conductance causes low heat dissipation rates in the medium and leakage issues of kinds of paraffin are two main restrictions for the application of PCM-based cooling strategies. Graphite matrix is a promising approach with high porosity, higher heat transfer surface-to-volume ratio, high thermal conductance, non-reactive nature (chemically), and also surrounding medium to avoid these disadvantages. Therefore, graphite matrix provides abundant highly conductive thermal paths (Mills et al., 2006; Kang et al., 2019) and shape-stabilized encapsulation (Zhang et al., 2021) to dissipate heat rapidly and overcome leakage issues respectively, for PCM medium.

The research on graphite matrix/foam with PCM is presented for battery thermal management as follows: Mills et al. (2006) published the first paper (based on author knowledge) on expanded graphite matrix with PCM for battery cooling. The authors studied thermal conductivity, paraffin mass fraction, and latent heat of fusion of PCM/graphite matrix composites. They reported the potential of the graphite composite with PCM. Kizilel et al. (2008) tested the potential of the graphite matrix composite with PCM compared to conventional active cooling systems. They observed that the cell surface temperature is lower temperatures by graphite-PCM case. Kizilel et al. (2009) performed a CFD study to illustrate the thermal performance of graphite composite with PCM for a cylindrical battery pack. The PCM/graphite matrix helped the battery to achieve a more uniform distribution and to avoid the propagation of a thermal runaway from one cell to the entire pack. Somasundaram et al. (2012) investigated the effect of different discharge rates on PCM/graphite matrix performance by a two-dimensional transient mathematical model. Authors reported that lower temperature values were measured with a graphite matrix composite. Greco et al. (2015) performed a numerical study considering the thermal responses of different configurations of graphite matrix composite. The importance of the mutual effect between latent heat and thermal conductivity was reported. Moreover, outputs show that the graphite matrix bulk density was a key parameter to optimize the graphite composite with PCM. An experimental investigation is carried out to show the effect of melting phase change composite on delaying thermal runaway for a single cell by Wilke et al. (2017). Authors reported that hot spot temperature is diminished by 60 °C, and so thermal runaway is inhibited due to propagation between cells following nail penetration. Jiang et al. (2016) carried out both an experimental and a numerical study for composite PCM-based (Expanded graphite/paraffin slurry) thermal management for li-ion cells under constant current. The thermal conductivity of PCM was enhanced with expanded graphite (EG), and packing in aluminium tubes. The configuration showed higher heat dissipation rates and lower temperature increase rates. However, the authors reported that the temperature gradient in the battery pack was near 12 °C. A similar study (EG/paraffin slurry) was also carried out under constant current by Lv et al. (2016). Wu et al. (2016) fulfilled an experimental study on the effect of copper mesh (CM)-enhanced paraffin (PA)/expanded graphite (EG) composite. To enhance both the thermal conductivity and strength of the proposed arrangement, the copper mesh

acts as a skeleton. As a result, the CM-enhanced PA/EG plate (PCMP) showed a higher heat dissipation rate and uniform temperature profile under constant discharge rates. A heat pipe-assisted PCM/EG-based battery thermal management (BTM) system is investigated with constant discharge currents by [Wu et al. \(2017\)](#). Research on the effect of two high thermal conductivity materials including aluminium and graphite foams, which are saturated with different phase change materials is conducted by [Mallow et al. \(2018\)](#). The authors reported that graphite foams showed superior performance compared to aluminium foams. [Ling et al. \(2018\)](#) performed two different slurries of graphite composites with PCM (graphite-PCM and graphite-PCM-Fumed silica) for battery thermal management. It is reported that the hot spot temperature value of the cell was diminished, and more temperature uniformity was provided with graphite-PCM. A similar study is performed by [Wang et al. \(2018\)](#). [Li et al. \(2018\)](#) extend the investigation with additional silica gel and Al-honeycomb (Al-Hc) components. It was declared by the authors that composite PCM could improve temperature uniformity and reduce the average temperature of the battery. [He et al. \(2019\)](#) proposed a composite PCM with a highly thermal conductive framework of EG/copper foam (CF) for battery thermal management. The results showed that the composite PCM-based battery pack with EG/CF (CPCM-EG/CF) achieves much better cooling and uniform temperature distribution than those without EG/CF or CF under constant discharge rates. A numerical study on the thermal response of the battery module via graphite composite was conducted by [Xin et al. \(2022\)](#). The authors investigated the effect of research parameters including composite PCM thicknesses, graphite mass fractions, and coolant flow directions/velocity/temperatures. [Akula & Balaji \(2022\)](#) carried out both a numerical and an experimental study to illustrate the effect of the proposed PCM-graphite composite slurry with a fin on the thermal management of a battery at constant discharge rates ( $> 2C$ -rate). Authors show remarkable enhancement in temperature increase rate/uniformity, thermal conductivity, and thermal capacitance with the addition of 30% expanded graphite (EG). This resulted in lower fin number usage in the heat sink compared to the heat sink without EG. [Yazıcı \(2022b\)](#) conducted an experimental study to test the effect of the various constant discharge currents on a thermal behavior of small-scale battery package. The author presents that the graphite matrix composite with phase change has remarkable outputs, especially, for higher discharge rates.

Researchers have studied experimentally/numerically the effect of graphite composite with PCM for battery cooling under constant discharge rates in the cited literature above. But, there are restricted studies tested under dynamic discharge conditions for cooling strategies with PCM. So, the motivation of this study is to explore the effect of the phase change temperature of graphite composite on the performance of small-scale battery packs under the dynamic/square wave discharge currents. The effect of the melting phenomenon and porous media on the thermal performance of li-ion is also presented comprehensively. To illustrate thermal response, transient temperature profile and thermal camera images are utilized. Moreover, for electrical behaviour, time-dependent energy capacity, discharge capacity and voltage variations are presented. Experimental results are given comparatively with a free-air cooling case to evaluate graphite matrix composite with various melting ranges of PCMs.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Phase change composite experimental setup and procedure

RT-35 and RT-42 (organic paraffin) supplied from Rubitherm are utilized to store dissipated heat by the Li-ion battery pack. Paraffin is an impressive material with great potential including, high latent heat of fusion, thermal/physical/chemical stability, no phase segregation, non-reactivity, proper compatibility with other materials and safe ([Ahmed et al., 2022](#)). The thermal properties of the paraffin and graphite matrix composites are given in Table 1. Heat flow as a function of the temperature of pure paraffin and graphite matrix composites was measured by Hitachi-7020 (DSC).

Table 1. Thermal properties of materials

Thermo-physical property	RT-35/42	Graphite matrix composite with RT-35	Graphite matrix composite with RT-42
Melting temperature (°C)	37.2/41.4	36.1	40.3
Latent heat (kJ kg <sup>-1</sup> )	150/162	144	148
Thermal conductivity (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.2/0.2	7.2	8
Density (kg m <sup>-3</sup> ) (at 25 °C)	860/880	796	730

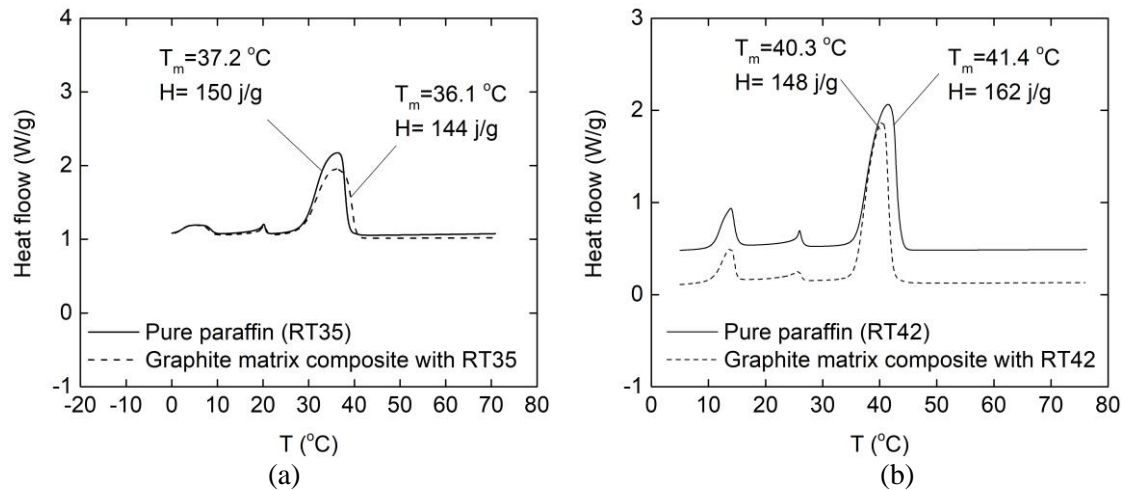


Figure 1. DSC analysis of pure paraffin and graphite composite of (a) RT35 (Yazıcı, 2022a,b) and (b) RT42 (Yazıcı and Saglam, 2021).

To build the graphite matrix, expanded graphite (EG) produced by heat treatment (expansion and exfoliation at 900 - 1 000 °C - 60 seconds) was pressurized in a mould using Instron 3382. The manufacturing process of expanded graphite can be found in detail in the literature (Py et al., 2001; Mills et al., 2006). In this experimental study, expandable graphite with 50 mesh, > %98 purity, and 700 ml g<sup>-1</sup> (maximum expansion rate) was provided by Asbury Carbon. Graphite matrix with an overall dimension of 75 mm (Length) x 52 mm (Width) x 60 mm (Height) and bulk density of 75 g l<sup>-1</sup> was produced for a small-scale battery pack (3s2p). to obtain a graphite matrix composite with phase change, the graphite matrix was immersed in a liquid paraffin bath (75-80 °C) for about 3-4 hours for saturation. The graphite matrix was saturated with melted paraffin via surface tension and capillarity (Py et al., 2001; Mills et al., 2006). The PCM quantity in the graphite composite with phase change is nearly 103 grams. The paraffin mass fraction is 92% in graphite composite. Transient PCM saturation in the graphite matrix is illustrated in Figure 2. The porosity ratio of the graphite matrix is measured at 85 % considering PCM volume. Impregnation encapsulation provides shape-stabilized PCMs (Zhang et al., 2021) to avoid PCM leakage from the matrix. The leakage test is given in Figure 3. The composite material is put on the paper and heated up to 75 °C for 150 minutes. It is observed that graphite composite with phase change saves its form with a very low leakage rate of 0.41% (0.42 grams) on the paper. This low leakage rate can be expressed by the melting of covered solid PCM on the surface.

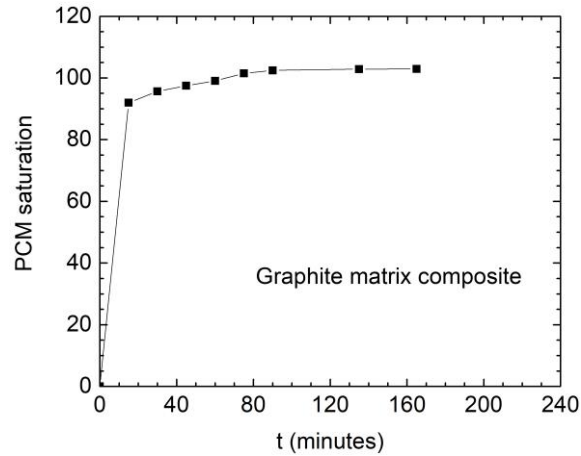


Figure 2. Transient PCM saturation.

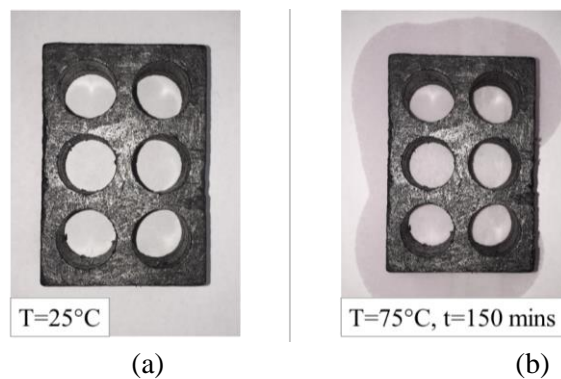


Figure 3. Leakage test: (a) T=25 °C, (b) T=75 °C (Yazıcı, 2022b).

To image structural topology, SEM (Scanning electron microscope, Zeiss EVO LS10) analysis was used. Structural images for the expanded graphite matrix and the graphite matrix composite are shown in Figure 4. Worm-like/vermicular particles are observed on the sample surface image for the graphite matrix (Figure 4a). Moreover, it is shown in Figure 4a that in terms of the overlapping and intersecting of graphite flakes, a honeycomb-like network is developed (Zou et al., 2020). However, some non-interlocking zones between expanded graphite layers (Figure 4a). for graphite matrix composite with phase, it is observed with the surface image of the sample in Figure 4b that the paraffin is impregnated to the matrix, and covers the surface.

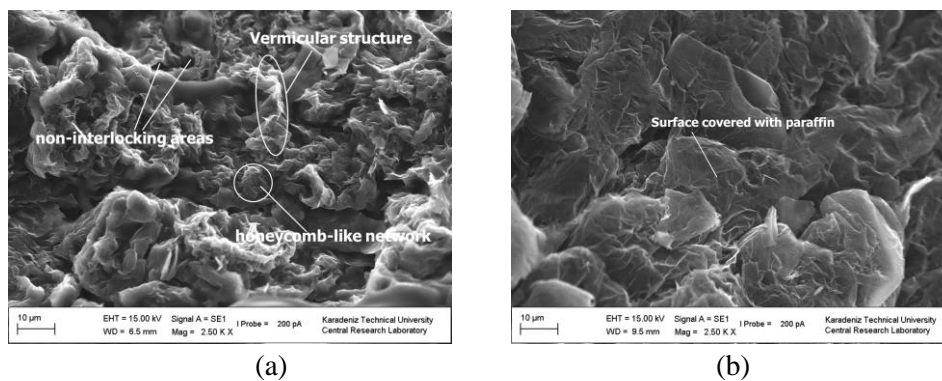
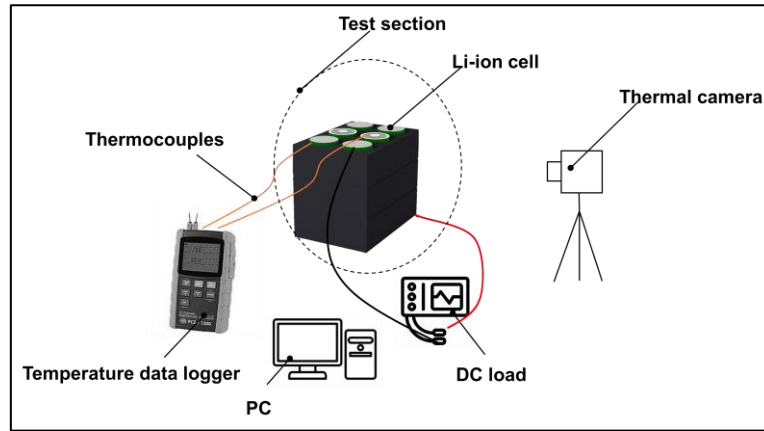


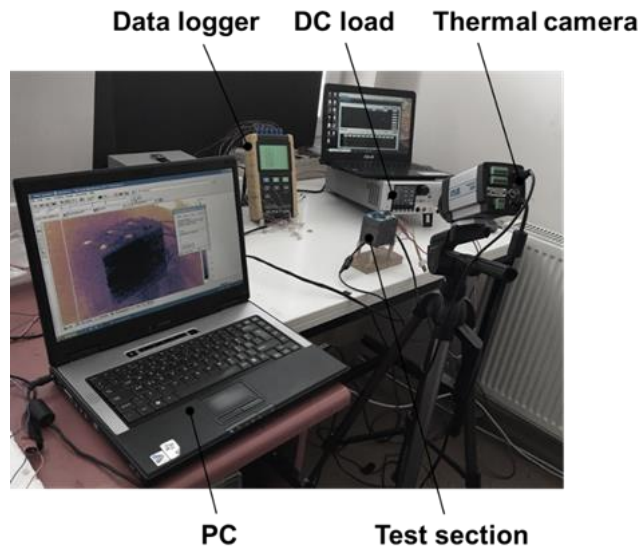
Figure 4. Structural topology images: (a) the graphite matrix and (b) the graphite matrix composite with phase change (RT-35).

## 2.2. Experimental setup and procedure

The experimental rig is given in Figure 5. It consists of a test section, a DC load, a data logger, a PC, and a thermal camera.



(a)



(b)

Figure 5. Experimental setup: (a) schematic view, (b) photograph.

The test section comprises li-ion cells, nickel sheets for cell connection, terminals, thermocouples and thermal management configurations including free-air cooling (Figure 6a) and graphite matrix composite with phase change (Figures 6b and c). To test the battery package (3s2p) under a dynamic load-the square wave, an electronic DC load (Chroma, CH-63004-150-60) with the accuracy of current of  $\pm 0.1\%$  F.S. ( $\pm 0.06$  amper) is used. The form of the square wave is presented in Figure 7. The dynamic discharge current is set as  $I_{\text{maximum}}=16$  A (2.5 C-rate) -  $t=16$ seconds and  $I_{\text{minimum}}=6.4$  A (1C-rate) -  $t=4$ seconds. For electric energy storage, a commercially available li-ion cell of NCR 18650B (Panasonic/Sanyo) is used to form a 3s2p battery pack/module. The cell and battery pack specifications are summarized in Table 2.



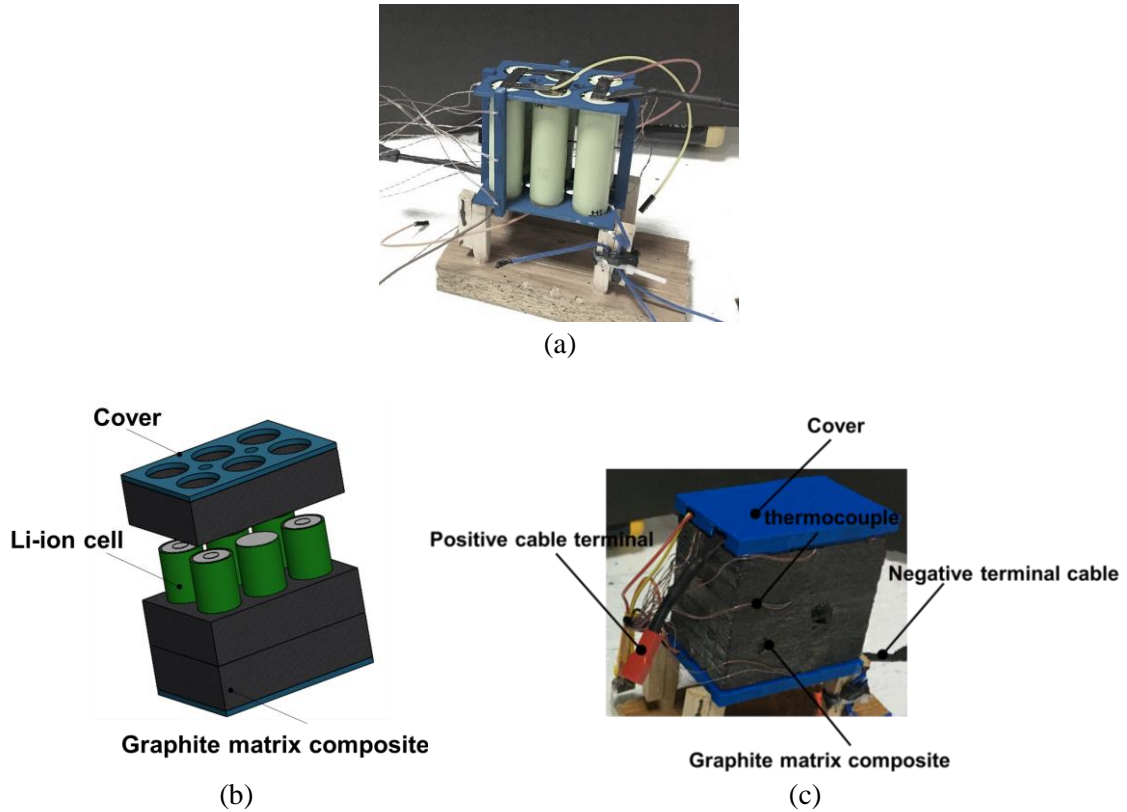


Figure 6. Test section: (a) free-air cooling case, (b) graphite matrix composite / schematic view, (c) phase graphite matrix composite / photograph.

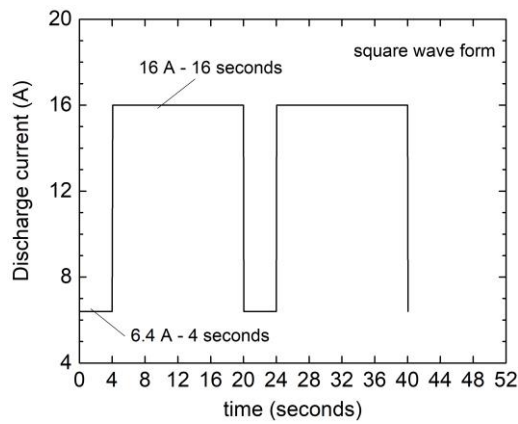


Figure 7. Discharge current variation: square wave form.

Table 2. Li-ion cell and pack specifications

Specification	Cell	Pack
Form factor	1s	3s2p
Capacity nominal (mA h)	3250	6500
Voltage nominal (V)	3.7V	11.1
Specific energy (W h kg <sup>-1</sup> )	243	258

Temperature measurement is the key evaluation criterion for the thermal performance of a thermal management system. Therefore, the time-dependent temperature history of the battery package is recorded with six T-type thermocouples (OMEGA brand) with an accuracy of  $\pm 1$  °C (or 0.75%). Time-dependent temperature data were recorded with a temperature data logger (PCE-1200) in five seconds intervals. Thermocouple positions/labels on the battery pack are presented in Figure 8. The



thermal camera (Flir, A20) was also used to support thermocouple measurements and also visualize the thermal image of graphite matrix composite with phase change and free-air cooling arrangements.

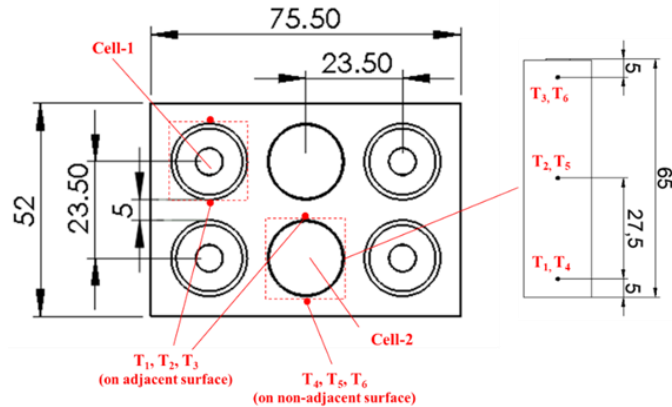


Figure 8. Temperature measurements locations/labels on the li-ion module.

Experiments were conducted in an air-conditioned ambient of 25 °C. Experiments were ended in terms of the limit operating temperature of 55 °C or cut-off voltage of 7.8 V value. It changes depending on which limit is provided first.

### 3. Results and Discussion

The experimental study is carried out on a small-scale of 3s2p li-ion battery package’s thermal and electrochemical behaviour under dynamic/square wave load for the performance evaluation of graphite matrix composite with phase change material considering two different melting temperatures (RT-35 and RT-42) of PCM. To illustrate the effect of the melting temperature point of graphite composite with phase change, transient temperature distributions and thermal camera images are presented in Figures 9 and 10, respectively. For the electrical performance of the battery pack under dynamic load, the voltage, discharge capacity and energy capacity variation are also shown in Figures 11 - 13. The free air-cooling case is also presented as a reference case in the figures.

Heat transportation in such a porous medium of graphite matrix composite has been considered conduction along highly conductive abundant thermal bridges (Mills et al., 2006; Kang et al., 2019). The advantage of highly conductive thermal bridges of the graphite matrix enhances the process of carrying and storing heat in the phase change phenomenon, which provides the usage of PCM in engineering applications. It should be noted that depending on pore sizes smaller than 10 mm, the natural convection in such a porous medium is suppressed (Kang et al., 2019).

Transient temperature profiles of li-ion cell-1 and cell-2 for free-air cooling and graphite composite are shown in Figure 9. For free-air cooling in Figures 9a and b, heat is not dissipated effectively on the surface of the li-ion cells due to low thermal conductance of  $0.025 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (at 25 °C) and low free-convection heat transfer rates. Lower heat dissipation rates from the li-ion surface results in a higher operating temperature of 55 °C, which is critical, in a shorter time of 8.25 minutes. The hot spots are  $T_{1/\text{cell-1}}$  and  $T_{3/\text{cell-2}}$  for Cell-1 and Cell-2, respectively, because more heat is generated at positive/negative poles. An almost linear increment in temperature is shown in Figures 9a and b. The temperature increase rate is about 3.65 °C/minutes ( $T_{3/\text{cell-2}}$ ). The local temperature point recordings of Cell-2 are higher (4.8 - 9.4 °C) than Cell-1. This temperature difference between cells is associated with the thermal effect of the surrounding li-ion cell-2. It means cell-2 exposes thermal effects more than cell-1 depending on surrounding cells. In addition, temperature values of  $T_{1-3/\text{cell-1}}$  and  $T_{1-3/\text{cell-2}}$ , which are placed on adjacent/ opposing surfaces, are higher compared to  $T_{4-6/\text{cell-1}}$  and  $T_{4-6/\text{cell-2}}$ , respectively, for each cell. This is the result of the thermal effect of opposing/adjacent surfaces to each other. It should be noted that heat loss from the outer/non-adjacent surfaces to the ambient is one of the reasons for this behaviour. So, these result in non-uniform temperature distribution on the battery pack, which causes adverse effects including unbalance of voltage between cells. From Figures

9a and b, the maximum temperature difference ( $T_{\max} - T_{\min} = T_{3/\text{cell-2}} - T_{5/\text{cell-1}}$ ) on the battery pack is about 9.4 °C.

For the graphite composite with different phase changes, the temperature increase rate is lower compared to free-air cooling in Figure 9c-f. With graphite matrix composite with phase changes, a more uniform temperature distribution is observed. This is the result of the highly conductive abundant thermal bridges, which provide effective heat dissipation from the li-ion surface, and also the thermal energy storage capability of PCM. Simultaneously, dissipated heat in graphite matrix composite with phase change is stored with paraffin in the form of sensible and latent heat. Temperature readings report variable temperature increase rates in different periods for graphite matrix composite with RT35 and RT42 in Figures 9c, d, e, and f. The variation of the temperature increase rate is clearer for the other local points, especially, of  $T_{4,5,6/\text{cell-1/2}}$  (non-adjacent surfaces) due to the lower temperature increase rate in terms of heat loss. For graphite matrix composite with RT35 and RT42, a steep increase is observed in the first period of  $t < 3$  minutes and  $t < 6$  minutes of discharging, respectively, due to sensible heat storage. In the following period of  $3 < t < 8 - 14$  minutes (for graphite matrix composite with RT35) and  $5 < t < 11 - 19$  minutes (for graphite matrix composite with RT42), temperature measurements reach the melting range, and then temperature rise slows down with a positive decrease due to phase transition (for RT35,  $T_m = 32 - 38$  °C; for RT42,  $T_m = 38 - 43$  °C, Rubitherm datasheet), which provides high energy storage capacity. In the next period of  $8 - 14 < t < 19.8$  minutes for graphite matrix composite with RT35 and  $11 - 19 < t < 18.67$  minutes for graphite matrix composite with RT42, the rate of temperature rise goes up depending on the completed phase transition phenomenon. To illustrate the thermal behaviour of graphite matrix composite with RT35 and RT42, the temperature increment rate for  $T_{3/\text{cell-2}}$  is given in the following as an example. It is shown in Figures 9d and f that a temperature reading ( $T_{3/\text{cell-2}}$ ) increases with 1.5 °C/minutes and 2 °C/minutes rates for RT335 and RT42 cases, respectively, for the first step ( $t < 6$  minutes). In the following step ( $6 \text{ minutes} < t < 18 \text{ minutes}$ ), the temperature value increases with the lower rates of 1.24 °C/minutes and 1.02 °C/minutes for RT335 and RT42 cases, respectively. For the RT42 case, the temperature increase rate is half of the first step. For the next step ( $t > 18$  minutes), the temperature increase rate is 2.5 °C/minutes with a 100 % increase for the RT35 case, while it is 0.75 °C/minutes with a 25% decrease for the RT42 case. This provides higher temperature values in the package for graphite matrix composite with RT42 in the period of  $t < 18$  minutes, while it is observed that lower temperature values are recorded after  $t > 18$  minutes. This is the only result of delaying phase change/latent heat storage period depending on the higher melting range for RT42. Because the melting process starts and completes earlier for the RT35 case, temperature values are lower at the initial period due to latent heat and then go up rapidly in terms of sensible heat storage, respectively. However, for the RT42 case, it is shown that some points just reach the upper limit of the melting point. So, rapid temperature increase after the melting process is not achieved by sensible heat. Graphite matrix composite with RT35 gets 3.6-8 °C higher temperature values than the RT42 case at  $t > 18$  minutes. For example, at  $t = 18$  minutes, temperature values of  $T_{3/\text{cell-2}}$  for graphite composite with RT35 and RT42 are 53.4 °C and 49.8 °C, respectively. To present the thermal response of the graphite matrix composite with RT35-RT42, and free-air cooling cases, temperature readings of  $T_{3/\text{cell-2}}$  are given at  $t = 8$  minutes as follows; 35.6 °C, 38.6 °C and 54.5 °C, respectively. Temperature non-uniformity ( $T_{3/\text{cell-2}} - T_{5/\text{cell-1}}$ ) is decreased to 6.2 °C and 8.7 °C with graphite matrix composite with RT35 and RT42, respectively. The outputs reveal that the operating temperature (at  $t = 8$  minutes) is about 34.7 % and 29.2% lower for the graphite matrix composite with RT35 and 42 in comparison to free-air cooling, respectively. Temperature difference (at the end of experiments) is decreased by 34 % and 7 % for the graphite matrix composite with RT35 and 42 compared to free-air cooling, respectively. In addition, safe operating time is 8.25 minutes, 18.67 minutes and 19.83 minutes for free-air cooling, graphite matrix composite with RT42 and RT35, respectively. Graphite matrix composite with RT35 achieved the longest operating time with an increase of 140.4 % and 6.2 % compared to free-air cooling and RT42 case, respectively. The experiments for free-air cooling and graphite composite with RT35 are terminated when the hot spot reaches the limit operating temperature (55 °C), while the experiments are ended with a cut-off voltage (7.8 V) for graphite composite with RT42.

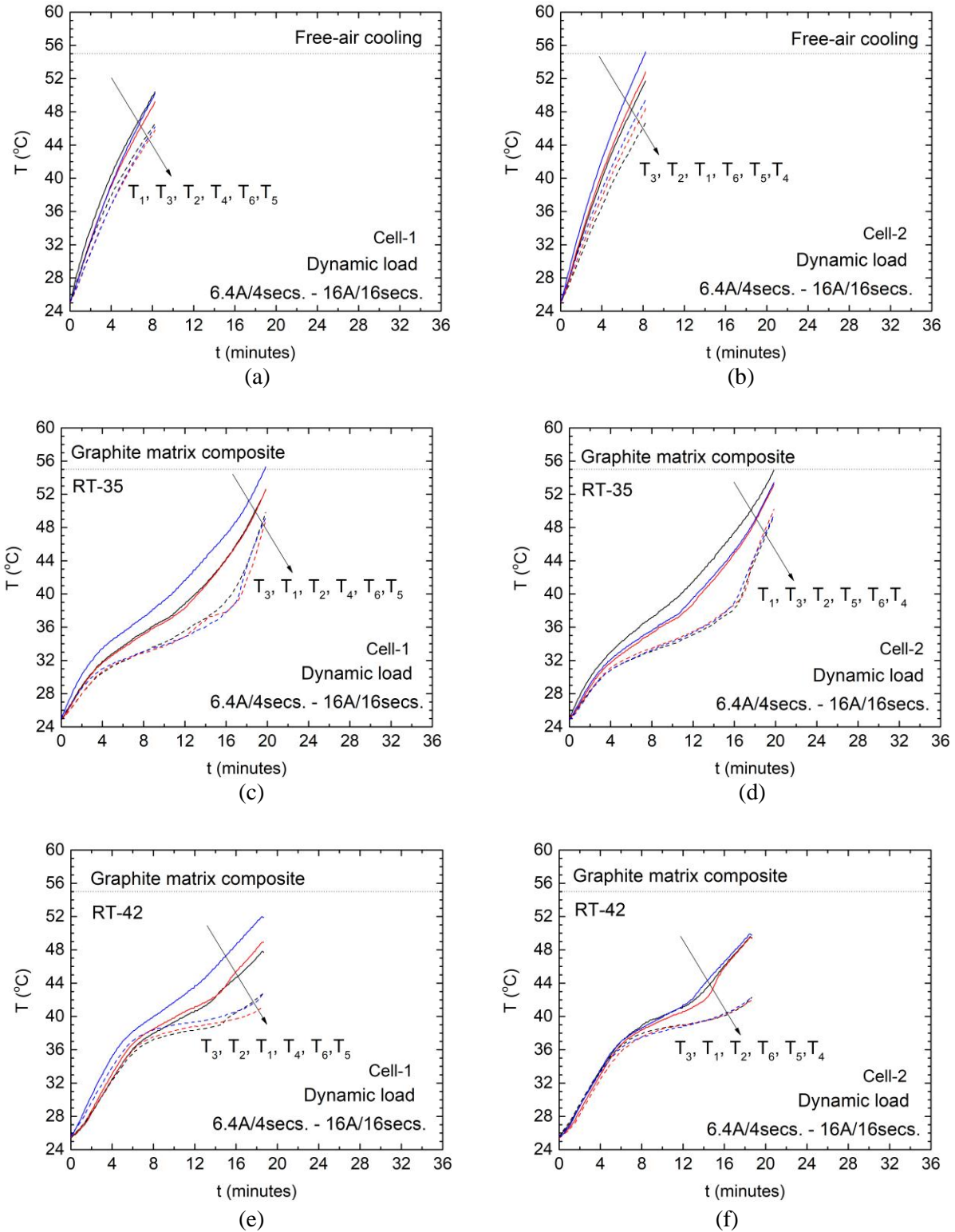


Figure 9. Transient temperature profiles of thermocouple points through the li-ion cell: free-air cooling (a and b), graphite composite; RT-35 (c and d), RT-42 (e and f).

Time-dependent thermal camera images are given in Figure 10. Temperature values show the outer surface temperature of the composite matrix (not directly cell temperature) for the graphite matrix composite with phase change cases, while it shows cell temperature for free-air cooling. Temperature reading increases fast for the free-cooling case. For the graphite composite cases, outer surface temperature values reflect cell temperature values given in Figure 8c - f. In the period of  $t < 18$  minutes, the surface temperature of graphite composite with RT42 has higher temperature

reading compared to graphite composite with RT35. Therefore, thermal images support the thermocouple measurement given in Figure 10c - f. Moreover, temperature gradients between the inner (cell temperature) and the outer surface of the package are approximately 9 °C for each case in Figures 10b and c.

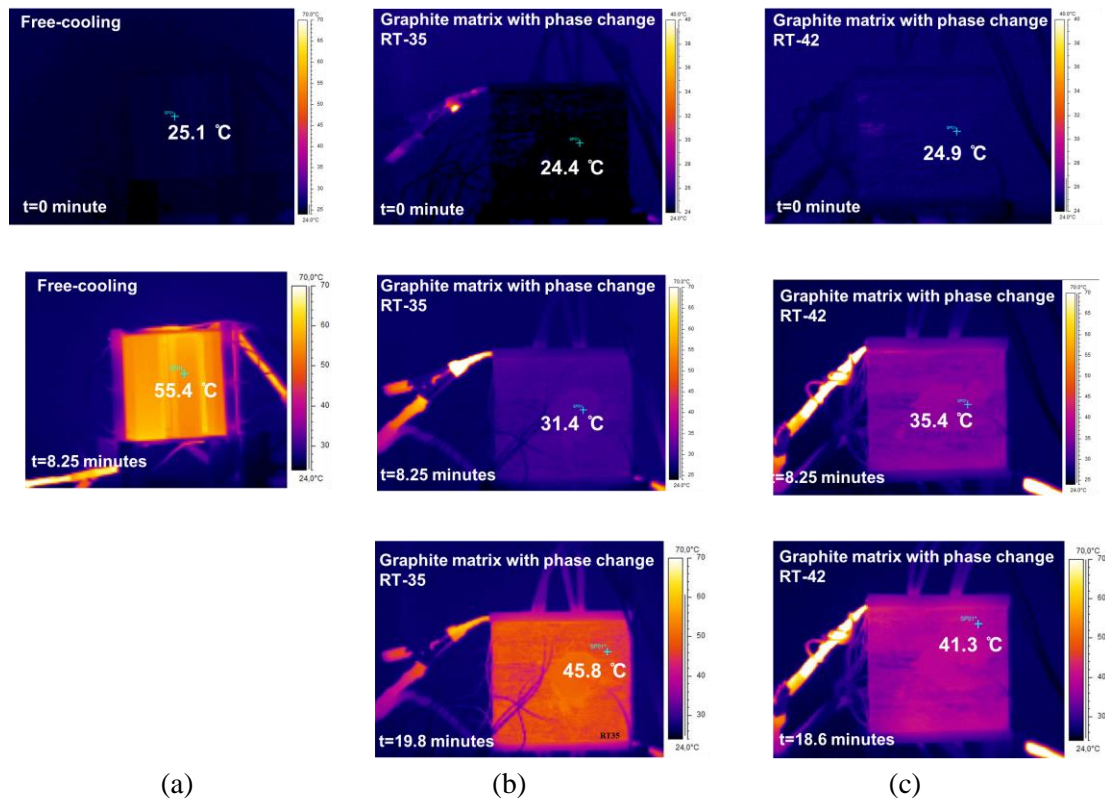


Figure 10. Time-dependent thermal camera photographs: natural convection (a), graphite matrix with RT35 (b) and RT42 (c).

The variation of discharge capacity with voltage (horizontal bottom line) and time depending (horizontal top line/red), transient energy capacity variation, and total energy capacity variation are presented in Figures 11, 12 and 13, respectively, to illustrate the electrical performance of cases. Discharge capacity variation does not decrease continuously during experiments in Figure 11. This is the result of the square wave load. For the highest discharge current of 16 A / 16 seconds, the voltage value decreased higher compared to the moment of the lowest discharge current of 6.4 A / 4 seconds. For example (graphite matrix composite with RT35), at the beginning of the experiment, the voltage decreased from 12.5 V to 11.448 V with the discharge current of 6.4 A / 4 seconds, then, for the next stage with 16 A / 16 seconds, the voltage value decreased 10.248 V suddenly. For the following stage (6.4 A / 4 seconds), the voltage value increases by 11.261 V suddenly in terms of discharge current, which affects ionic movement, and so voltage value variation. Discharge capacity values of free-air cooling and graphite matrix composite with RT 35 and RT42 are 1.93 A h, 4.65 A h and 4.34 A h, respectively. So, the discharge capacity is increased by 141% and 125% for graphite matrix composite with RT35 and RT 42 in comparison to free-air cooling, respectively. Due to the higher temperature increase rate, the discharge capacity is restricted considering the safe temperature (50 °C) for free-air cooling. For graphite composite with RT35, the discharge capacity value is 7% higher compared to RT42 cases depending on the higher operating temperature in safe limits (Figure 9 - 10), which provides higher ionic conductivity of the electrolyte and solid-electrolyte interface and high solid-state diffusion (Yazıcı, 2022a).

Time-dependent energy capacity profiles are presented in Figure 12. Energy capacity, which means power delivered for an hour by the battery, is increasing trend with an increase/decrease profile. Figure 12a - c show that the consumed energy of the battery pack is higher for the graphite matrix composite cases in comparison with the free-air cooling case. In other words, more amount of work is

performed by battery package with graphite matrix composites. This is the result of extended safe operating conditions, in which temperature is one of the key parameters. In addition, the energy capacity reading reaches a higher value in the case of RT35. The total energy capacity values are given for each case with a column chart in Figure 13. The energy capacity delivers 18.5 W h, 37.3 W h and 34.06 W h for free-air cooling and graphite matrix composite with RT35 and 42, respectively. This provides almost 102 % and 84 % more power for an hour for graphite matrix composite with RT35 and RT42 compared to air-cooling. On the other side, 10% more energy capacity for the same initial conditions is achieved by graphite composite with RT35 than RT42 case.

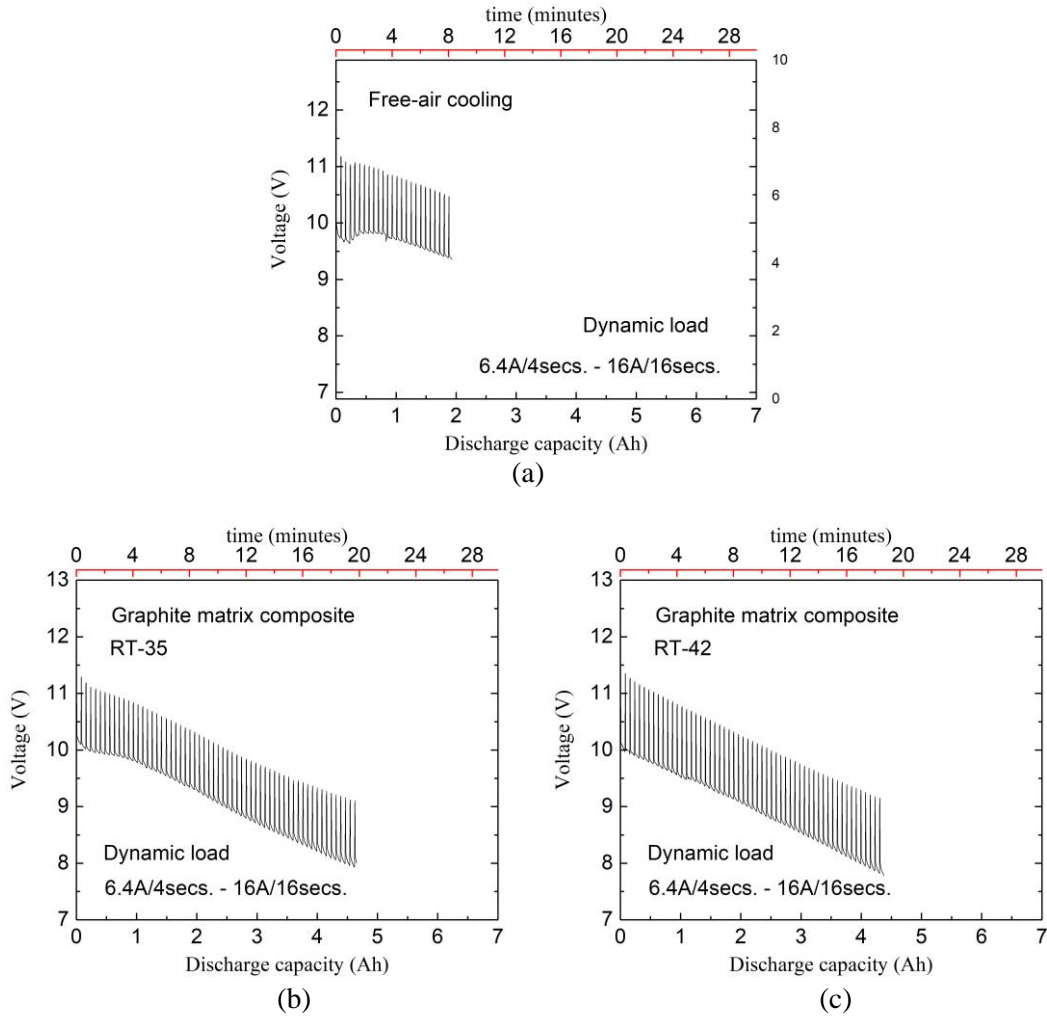


Figure 11. Discharge capacity-voltage-time variation during discharge; (a) free-cooling, graphite matrix with phase change; (b) RT-35, (c) RT-42.

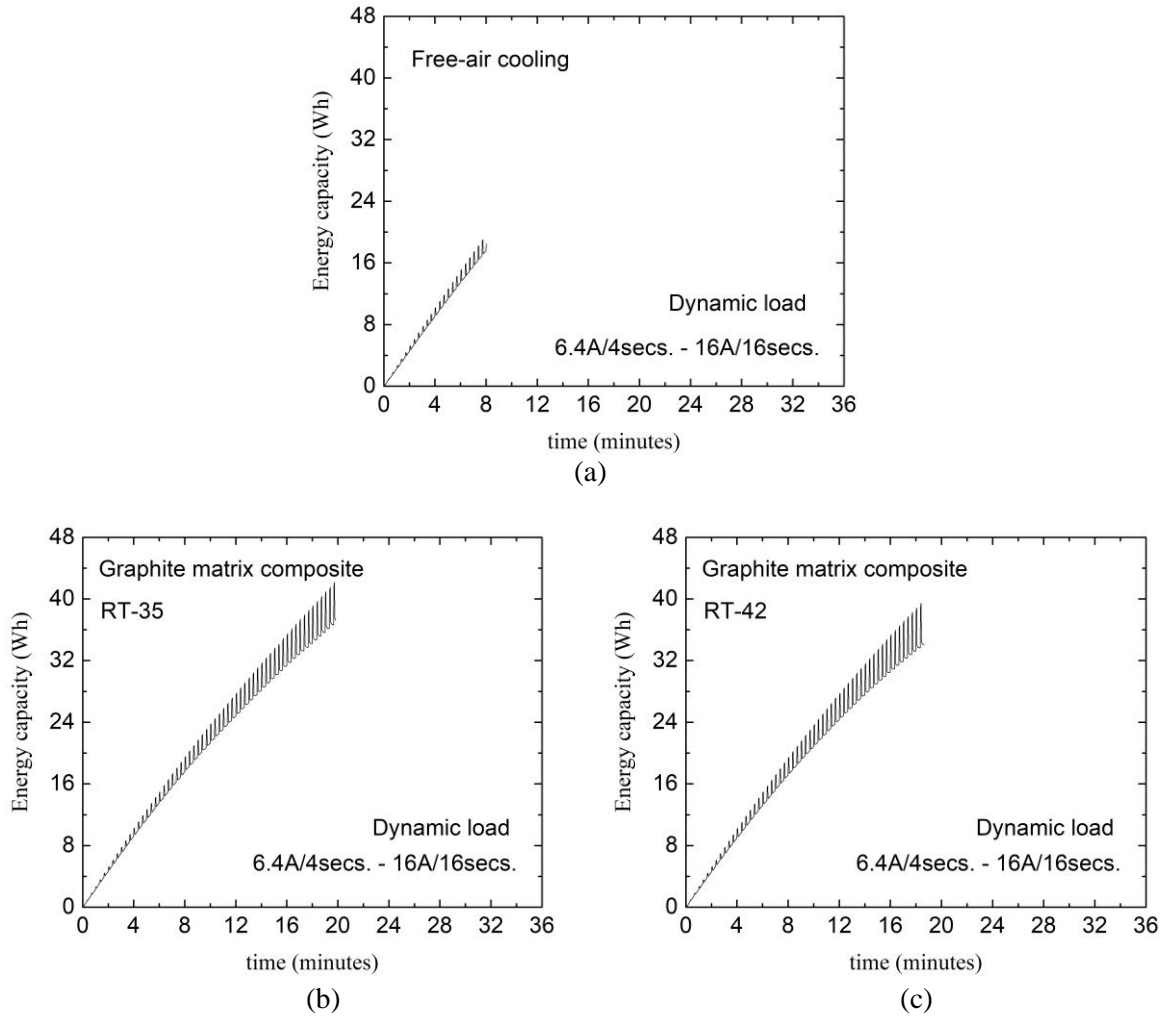


Figure 12. Energy capacity variation: (a) free-cooling, graphite matrix with phase change; (b) RT35, (c) RT42.

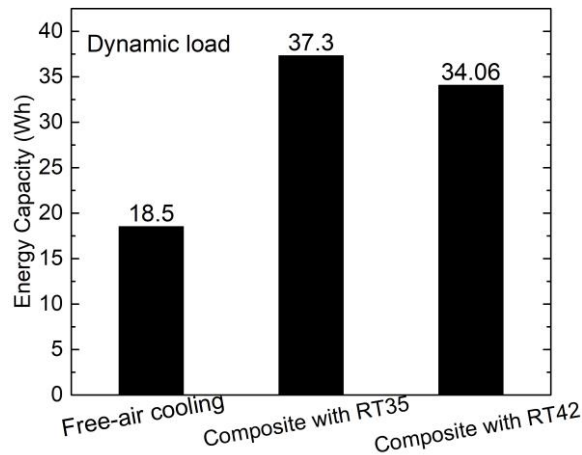


Figure 13. Total energy capacity values for each case.

#### 4. Conclusion

The effect of the phase transition temperature of the graphite composite with phase change on the performance characteristics under square wave load form is explored. Graphite matrix composites



with different phase change points show considerable outputs for the performance of small-scale battery packages. The main outputs are presented below:

- For the graphite composite with RT35 and RT42, the operating temperature is reduced by 34.7 % and 29.2 % compared to free-air cooling, respectively.
- For the graphite composite with RT35 and RT42, the safe operating time increased by 140 % and 126 % compared to free-air cooling, respectively.
- For the graphite composite with RT35 and RT42, the discharge and energy capacity values are augmented by 141 % and 102 %, respectively, in comparison with free-air cooling.
- Graphite composite with RT35 has higher temperature values ( $t > 18$  minutes), which provides higher ionic conductivity depending on the phase transition point.
- Graphite composite with RT35 provides 28.7 % better temperature uniformity in the package.
- Graphite matrix composite with RT35 achieved 6.2 % higher operating time in safe limit compared to the RT42 case.
- Graphite matrix composite with RT35 provides 7 % and 10 % higher discharge capacity and energy capacity values in comparison with RT42 cases, respectively.

### Acknowledgements

This study was financially supported by TUBITAK TEYDEB with project number 2180111.

### References

- Ahmed, S. F., Rafa, N., Mehnaz, T., Ahmed, B., Islam, N., Mofijur, M., Hoang, A. T., & Shafiullah, G. M. (2022). Integration of phase change materials in improving the performance of heating, cooling, and clean energy storage systems: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 364, 132639. doi:10.1016/j.jclepro.2022.132639
- Akula, R., & Balaji, C. (2022). Thermal management of 18650 Li-ion battery using novel fins PCM EG composite heat sinks. *Applied Energy*, 316, 119048. doi:10.1016/j.apenergy.2022.119048
- Arora, S. (2018). Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging Technologies. *Journal of Power Sources*, 400, 621 - 640. doi:10.1016/j.jpowsour.2018.08.020
- Greco, A., Jiang, X., & Cao, D. (2015). An investigation of lithium-ion battery thermal management using paraffin/porous-graphite-matrix composite. *Journal of Power Sources*, 278, 50 - 68. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.12.027
- He, J., Yang, X., & Zhang, G. (2019). A phase change material with enhanced thermal conductivity and secondary heat dissipation capability by introducing a binary thermal conductive skeleton for battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 148, 984 - 991. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.11.100
- Jiang, G. W., Huang, J., Fu, Y., Cao, M., & Liu, M. (2016). Thermal optimization of composite phase change material/expanded graphite for Li-Ion battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1119 - 1125. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.07.197
- Kang, S., Choi, J. Y., & Choi, S. (2019). Mechanism of heat transfer through porous media of inorganic intumescent coating in cone calorimeter testing. *Polymers*, 11(2), 221. doi:10.3390/polym11020221
- Kizilel, R., Lateef, A., Sabbah, R., Farid, M. M., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2008). Passive control of temperature excursion and uniformity in high-energy Li-ion battery packs at high current and ambient temperature. *Journal of Power Sources*, 183(1), 370 - 375. doi:10.1016/j.jpowsour.2008.04.050
- Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2009). An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *Journal of Power Sources*, 194, 1105 - 1112. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.06.074
- Li, J., Huang, J., & Cao, M. (2018). Properties enhancement of phase-change materials via silica and Al honeycomb panels for the thermal management of LiFeO<sub>4</sub> batteries. *Applied Thermal Engineering*, 131, 660 - 668. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.12.023

- Ling, Z., Wen, X., Zhang, Z., Fang, X., & Gao, X. (2018). Thermal management performance of phase change materials with different thermal conductivities for Li-ion battery packs operated at low temperatures. *Energy*, 144, 977 - 983. doi:10.1016/j.energy.2017.12.098
- Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304 - 330. doi:10.1016/j.enconman.2017.08.016
- Lv, Y., Yang, X., Li, X., Zhang, G., Wang, Z., & Yang, C. (2016). Experimental study on a novel battery thermal management technology based on low density polyethylene-enhanced composite phase change materials coupled with low fins. *Applied Energy*, 178, 376 - 382. doi:10.1016/j.apenergy.2016.06.058
- Mallow, A., Abdelaziz, O., & Graham, S. (2018). Thermal charging performance of enhanced phase change material composites for thermal battery design. *International Journal of Thermal Sciences*, 127, 19 - 28. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.027
- Mills, A., Farid, M., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2006). Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1652-1661. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.11.022
- Py, X., Olives, R., & Mauran, S. (2001). Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(14), 2727 - 2737. doi:10.1016/S0017-9310(00)00309-4
- Somasundaram, K., Birgersson, E., & Mujumdar, A. S. (2012). Thermal-electrochemical model for passive thermal management of a spiral-wound lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 203, 84 - 96. doi:10.1016/j.jpowsour.2011.11.075
- Wang, W., Zhang, X., Xin, C., & Rao, Z. (2018). An experimental study on thermal management of lithium-ion battery packs using an improved passive method. *Applied Thermal Engineering*, 134, 163 - 170. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.02.011
- Wilke, S., Schweitzer, B., Khateeb, S., & Al-Hallaj, S. (2017). Preventing thermal runaway propagation in lithium-ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study. *Journal of Power Sources*, 340, 51 - 59. doi:10.1016/j.jpowsour.2016.11.018
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Ke, X., Wang, Z., Situ, W., Li, X., & Zhang, J. (2016). An experimental study of thermal management system using copper mesh-enhanced composite phase change materials for power battery pack. *Energy*, 113, 909 - 916. doi:10.1016/j.energy.2016.07.119
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Chen, K., & Wang, S. (2017). Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material-based battery thermal management system. *Energy Conversion and Management*, 138, 486 - 492. doi:10.1016/j.enconman.2017.02.022
- Xin, Q., Xiao, J., Yang, T., Zhang, H., & Long, X. (2022). Thermal management of lithium-ion batteries under high ambient temperature and rapid discharging using composite PCM and liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 210, 118230. doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118230
- Yazıcı, M. Y., & Saglam M. (2021). *Thermal management of small-scale Li-Ion battery module using graphite matrix composite with phase change: Effect of phase transition temperature*. 23rd Congress on Thermal Science and Technology with International Participation (ULIBTK 2021), Gaziantep.
- Yazıcı, M. Y. (2022a). The effect of a new design preheating unit integrated to graphite matrix composite with phase change battery thermal management in low-temperature environment: An experimental study. *Thermal Science and Engineering Progress*, 29, 101244. doi:10.1016/j.tsep.2022.101244
- Yazıcı, M. Y. (2022b). Thermal management of small-scale Li-ion battery module using graphite matrix composite with phase change: Effect of discharge rate. *Iğdir Üniversitesi Journal of the Institute of Science and Technology*, 12, 389 - 402. doi:10.21597/jist.952021
- Zhang, S., Feng, D., Shi, L., Wang, L., Jin, Y., Tian, L., Li, Z., Wang, G., Zhao, L., & Yan, Y. (2021). A review of phase change heat transfer in shape-stabilized phase change materials (ss-PCMs) based on porous supports for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110127. doi:10.1016/j.rser.2020.110127

- Zichen, W., & Changqing, D. (2021). A comprehensive review on thermal management systems for power lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110685. doi:10.1016/j.rser.2020.110685
- Zou, T., Liang, X., Wang, S., Gao, X., Zhang, Z., & Fang, Y. (2020). Effect of expanded graphite size on performances of modified CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O phase change material for cold energy storage. *Microporous and Mesoporous Materials*, 305, 110403. doi:10.1016/j.micromeso.2020.110403



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Küresel Isınma Etkisi Altında Antik Kentlerin Mevcut Durum Analizi

Merve DENİZ<sup>\*1</sup>, Ruşen YAMAÇLI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 26000, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 26000, Eskişehir, Türkiye

Merve DENİZ, ORCID No: 0000-0002-6341-0264, Ruşen YAMAÇLI, ORCID No: 0000-0001-9659-9246

\*Sorumlu yazar e-posta: deniz\_merve13@hotmail.com

#### Makale Bilgileri

Geliş: 15.10.2022

Kabul: 20.02.2023

Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1189637

#### Anahtar Kelimeler

Antik kent,  
Ekosistem,  
Kültür,  
Küresel ısınma,  
Yeşil alan

**Öz:** Küresel ısınma, 21. yüzyılın en büyük problemlerinden biri olup ekosistemi tehdit etmektedir. Çeşitli olaylara ya da durumlara maruz kalmalarına rağmen günümüze kadar gelmeyi başarmış tarihi yapılar, antik kentler ve peyzaj alanları birer kültürel mirastır. Dolayısıyla arşiv belgesi niteliğinde oldukları için korunmaları önem arz etmektedir. Ancak dünya için risk teşkil eden küresel ısınma doğal kaynakları tüketmesinin yanında bu niteliği sahip yerlerin gelecek kuşaklara aktarılmasını da zor duruma sokmaktadır. Bu çalışmanın amacı küresel ısınma etkisi altında antik kentlerin mevcut durumunu incelemektir. Çalışma boyunca öncelikle teorik altyapıyı hazırlamak için kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Ardından Priene, Pergamon, Aspendos, Anavarza, Tarsos, Carnuntum, Stonehenge, Kolezyum, Pompeii antik kentleri seçilerek küresel ısınma sürecinde zarar görebilirlikleri, mevcut durumlarının incinebilirlikleri ve söz konusu sürecin etkileri analiz edilerek yorumlanmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda ülkemizdeki antik kentlerin sürdürülebilirliği için bir model geliştirilerek arkeopark önerisi sunulmuştur.

### Analysis of the Current Situation of Ancient Cities Under the Influence of Global Warming

#### Article Info

Received: 15.10.2022

Accepted: 20.02.2023

Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1189637

#### Keywords

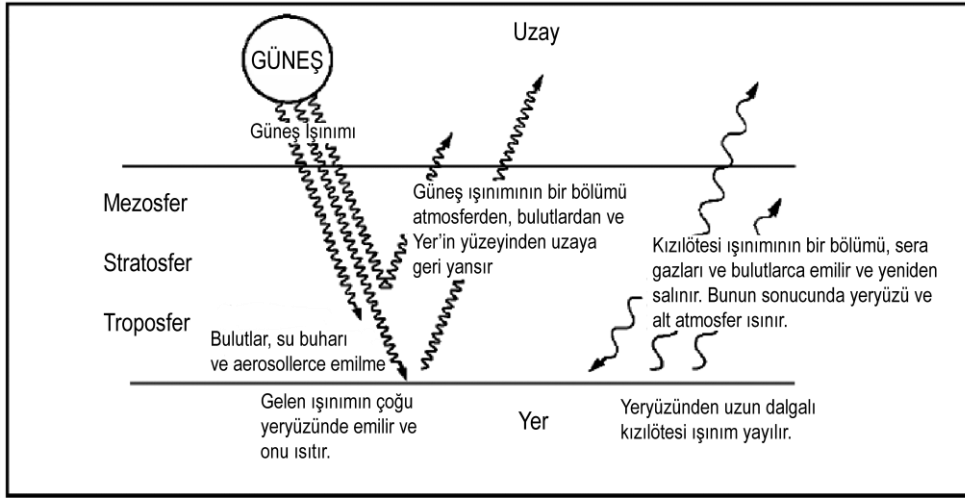
Ancient city,  
Culture,  
Ecosystem,  
Global warming,  
Green space

**Abstract:** Global warming is one of the biggest problems of the 21st century and threatens the ecosystem. Despite being exposed to various events or situations, historical buildings, ancient cities and landscape areas that have managed to survive to the present day are cultural heritage. Therefore, they must be protected because they are archive documents. However, global warming, which poses a risk for the world, not only consumes natural resources, also makes it difficult to transfer places with this quality to future generations. This study aims to examine the current situation of ancient cities under the influence of global warming. Throughout the study, first of all, a comprehensive literature review was conducted to prepare the theoretical infrastructure. Then, the ancient cities of Priene, Pergamon, Aspendos, Anavarza, Tarsos, Carnuntum, Stonehenge, Colosseum, Pompeii were selected and their vulnerability in the global warming process, the vulnerability of their current situation and the effects of the process were analyzed and interpreted. As a result of the findings obtained, a model was developed for the sustainability of the ancient cities in our country and an archeopark proposal was presented.

## 1. Giriş

İlk kez İsveçli kimyager Svante Arrhenius tarafından 1896 yılında sera etkisinin iklim değişikliğine sebep olacağı ifade edilmiştir (Rezafar, 2011). Sanayileşme ve beraberinde yaşanan modernleşme akımı ile toplumsal ilerleme başlamıştır. Özellikle insanoglu yeni iş imkânlarından faydalanmak için kırdan kente göç etmiştir. Bu durum kentleşme oranını hızlandırdığından üretim ile tüketim miktarı artmıştır. Nitekim kentlerde gittikçe nüfusun artması barınma ihtiyacını doğurmuş ve bu kapsamda imar çalışmalarına ağırlık verilmiştir. Dolayısıyla düzensiz ve çarpık yapılaşma ortaya çıkarak birçok yer plansız kentleşmeye doğru gitmiştir. Bu nedenle yerleşimler oksijensiz alanlara dönüşmüş, doğa zarar görmüş ve doğal kaynaklar çabuk tüketilmeye başlanmıştır. Dünyanın sıcaklığı ise git gide yükselerek 21. yüzyılın en önemli evrensel problemi olan küresel ısınma meydana gelmiştir. Söz konusu sıcaklık ekosistemin dengesini bozduğundan buzullar erişmiş, deniz ve okyanus seviyesinde yükselme görülmüş, çölleşme, kuraklık, orman yangınları gibi tehditler gün yüzüne çıkmaya başlamıştır. Farklı hastalıkların ortaya çıkmasına neden olan bu durum neticesinde tüm canlı türlerinin tehlike altında olduğunu söylemek mümkündür. Bilhassa da bazı hayvan türlerinin sayısı azaldığından nesilleri tükenme riski taşımaktadır.

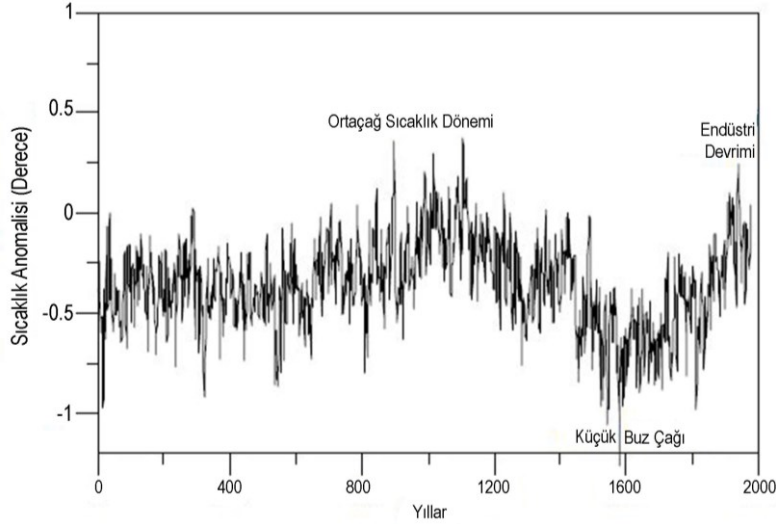
Karbondiyoksit, metan gibi gazlara sera gazı denilmekte olup bu gazlar atmosfere gitmektedir (Abrahamson, 1989). Sera etkisi sonucunda ise ekosistemdeki sıcaklık değeri artmakta ve küresel ısınma olarak ifade edilmektedir (Şekil 1). Söz konusu gazlar sanayileşme ile birlikte artmaya başlamış ve günümüzde gittikçe artması küresel ısınmayı meydana getirmiştir. Bu durumun günümüzde ve gelecekte ekosistem için risk teşkil edeceğini söylemek mümkündür. Ayrıca küresel ısınmaya sebep olan etkenleri doğal ve insan kaynaklı olarak ayırmakta fayda vardır. Bu bağlamda sanayileşme, yenilenemez enerji kaynaklarının kullanımı, nüfus artışı, hızlı kentleşme, ormanların yok edilmesi insan kaynaklı iken okyanusal ısı değişimleri, göktaşları, volkanik hareketler sonucu atmosfere yayılan maddeler, kıta hareketleri, atmosferdeki kimyasal değişimler, volkanik tozlar ise doğal kaynaklı etkenlerdir.



Şekil 1. Şematik olarak sera etkisinin gösterimi (Türkeş ve ark., 2000).

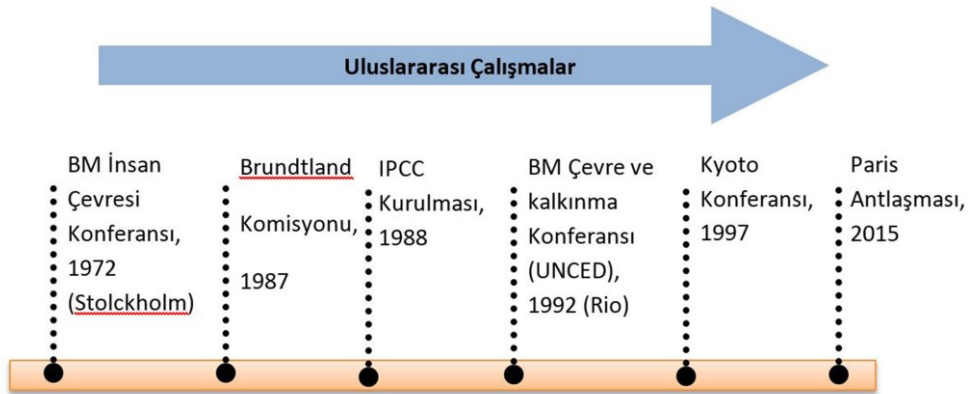
Buzul Çağı'nın yaşanmasından sonra sıcaklık hızlıca artmış ve bu durum tarıma geçişi kolaylaştırmıştır (Moberg ve ark., 2005). Son iki bin yıl içerisinde farklı sıcaklık eğrileri gözlemlenmiş ve bu sıcaklıklar dört döneme ayrılmıştır (Şekil 2). İlk 600 yılı kapsayan birinci dönemde sıcaklıklar daha sonraki yıllara nazaran 0.4 derece daha düşük olmuştur. Ardından 600'lü yıllardan sonra ısınma gözlenerek en yüksek değerini Milattan Sonra 1000-1200 yıllarına karşılık gelmiştir. Nitekim Ortaçağ Dönemi olarak da adlandırılan bu dönemde ılık kışlar yaşanmış ve yeterli seviyede yağmur yağışları meydana gelmiştir. 1300'lü yıllarda başlayan, 1850'li yıllara kadar süren ve Küçük Buzul Çağı olarak isimlendirilen bu tarihler arasında dünya genelinde soğukluk yaşanmıştır. Söz konusu dönemde çok soğuk kışlar yaşanmış ya da yazlar soğuk ve aşırı yağmurlu geçmiştir. Bu durum nedeniyle tarımsal faaliyetlerin yapılması zorlaştığı için Avrupa'da kıtlık ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla toplumun açlık

çekmesi üzerine bireylerin direncinin düşmesi veba salgınının baş göstermesine neden olmuştur. Nitekim 1258 yılında yaşanan büyük volkanik patlamalar sonucu meydana gelen ani soğuma küçük buzul çağını başlatmıştır. 1400'lü yıllarda şiddetli fırtınalar ve iklimsel salınımlar, 1580'de soğukların artması, 1500-1600 yılları arasında Alp Dağları buzullarının ilerlemesi, 1600'de Huanyaputine volkanının patlaması, 1670-1710 Küçük Buzul Çağının en soğuk dönemi, 1710-1740 nispeten daha sıcak bir dönem, 1740-1760 Kuzey Yarım Küre'de buzul ilerlemesi yaşanmıştır (Vural, 2016). İlave olarak 1815'te Pasifik Okyanusu'nda konumlanan Tambora yanardağının patlaması sonucu atmosfere küller yayılmış ve böylelikle dünya soğumaya başlamıştır. Söz konusu olay ile Avrupa'da yaz ayları oldukça kar fırtınalı ve soğuk geçmiştir. Bir diğer volkan patlaması ise 1883'te Hint Okyanusu'nda bulunan Krakatoa yanardağında yaşanmıştır. Buradan yayılan küller yine soğumaya yol açmıştır (Albek, 2013).



Şekil 2. Son iki bin yıl içerisindeki sıcaklık değişimleri (Albek, 2013).

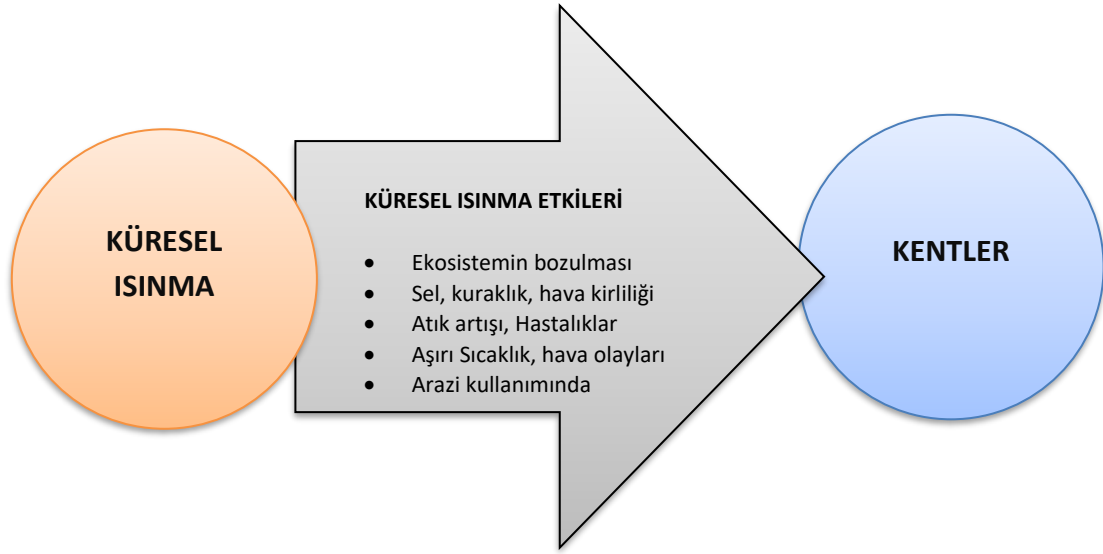
Kuraklığın, sıcaklığın artmasının, buzulların erimeye başlamasının dünya genelini etkileyeceği bilinen bir gerçek olup tüm insanlık için sorun yaratacağı uluslararası düzeyde fark edilmiştir. Dolayısıyla gerekli tedbirlerin alınması ve çözüm önerilerinin getirilmesi önem arz etmiştir. Bu bağlamda 1972'de önemli bir adım olarak Stockholm Antlaşması Birleşmiş Milletler İnsan Çevre Konferansı tarafından imzalanmıştır. 1988 yılında İklim Konferansı Toronto'da düzenlenmiş ve bu konferansta iklim değişikliği kavramı uluslararası düzeyde kabul edilmiştir. Yine aynı yıl Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) oluşturulmuştur. Fakat ciddi anlamda ilk kapsamlı girişimin 1989 yılında Birleşmiş Milletler öncülüğünde başlatıldığını söylemek mümkündür (Jamali, 2007). 2015'te ise Paris Antlaşması, sera gazı ile küresel ısınma kavramlarına dair ortak bir kararın verilmesi ve beraberinde çözüm önerilerinin sunulması adına Paris'te imzalanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Küresel ısınma hakkında yapılan uluslararası çalışmalar.



Toplumun yaşamsal faaliyetlerinin devam ettirildiği alanlar olan kentlerde, insanlığın yerleşik yaşam düzenine geçmesinden itibaren pek çok açık ya da kapalı mekân inşa edilmiştir. Dolayısıyla bu mekânlarda geçmişten günümüze çeşitli toplumların hâkimiyet kurduğunu söylemek mümkün olup söz konusu toplumların izlerini görmek olasıdır. Fakat buraların 21. yüzyılın en büyük küresel sorunu haline gelen küresel ısınma tehdidi altında olduğunu belirtmekte fayda vardır (Fatorić & Seekamp, 2017). Nitekim iklim değişikliğine bağlı olarak meydana geleceği öngörülen kasırga, erozyon, sel, taşkın ve kuraklık gibi hadiselerin ekosistemin çeşitli alanlarını etkileyeceği aşikârdır (REC, 2006) (Şekil 4). İlâveten Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli 'nin (IPCC) 3. Değerlendirme raporunda ekonomik seviyesi düşük toplumlarda ya da yaşlı bireylerde farklı tür hastalıkların ortaya çıkacağı, ani ölümlerin artacağı, salgın vakaların yaygınlaşacağı, tarımsal faaliyetlerin azalacağı, zemin seviyesinde çekilme olacağı, yapıların zarar göreceği, su kaynaklarının tükeneceği, yenilenemez enerji kaynaklarının yitirileceği belirtilmiştir (Schneider & Sarukhan, 2001). Bu bağlamda İtalya'daki sel felaketinin toprak kaymalarına neden olduğunu, 2010 senesinde İngiltere'de şiddetli yağışların elektrik kesintisine yol açtığını, 2016'da Sırbistan ile Hırvatistan'da taşkınların meydana geldiğini örnek olarak ifade etmek muhtemeldir (Robrecht, 2015).



Şekil 4. Küresel ısınma sebebiyle kentlerde meydana gelebilecek durumlar.

Yeşil alanlar, bünyesinde ağaçlar ile bitkilerin yer aldığı ve toplumun kolayca ulaşabildiği kentlere ait mekânlardır (Croce & Vettorato, 2021). Nitekim söz konusu alanlar hem dünyanın oksijen seviyesini yükseltmekte hem de doğal ve kültürel özelliklere sahip olup toplumun sosyalleşmesine, kent kimliğinin inşa edilmesine katkı sağlamaktadır. İlkçağlardan günümüze ulaşmış ve tarihi ile kültürel kalıntılara sahip antik kentler ise birer yeşil alan olup içinde buldukları dönemin yapım tekniğini, üslubunu ve malzemesini aktarmaktadırlar (Lachowycz & Jones, 2013) (Şekil 5). Ancak endüstrileşme yeşil alanların çabuk yitirilmesine ve kentlerin çarpıklaşmasına sebep olmuştur. İklim değişikliğinden etkilenen alanlardan biri de tarihi çevreler olup bu çevrelerdeki kalıntılar söz konusu değişiklikler nedeniyle tahrip olmuştur (Dupont & Van Eetvelde, 2013). Nitekim bu durum Antik Dönemlerden beri görülmeye başlanmıştır. Zira daha o dönemlerde deniz seviyelerinde meydana gelen değişim ile birçok antik kent etkilenmiştir. Söz konusu kentlerin birçoğu deniz seviyesindeki artış sebebiyle sular altında kalmış birçoğu ise deniz seviyesinde oluşan alçalmalar ile akarsular tarafından doldurulan kıyılar nedeniyle buldukları konumdan uzaklaşmışlardır (Özdemir, 2004). Trova, Milet, Priene, Efes, Pieria, Patara, Seleukeia kentleri örnekler olarak bilinmektedir (Erol, 1992). En bilinen örnek ise Efes Antik Limanı olup geçmiş dönemlerde iklim değişikliği etkisi altında şekil değiştirmiştir (Yılmaz ve ark., 2015). Nitekim deniz seviyesinin yükselmesi sonucu arkeolojik alanlar etkilenmekte ve bu durum söz konusu alanlarda hasara yol açmaktadır (Anderson ve ark., 2017). Bu bağlamda 21. yüzyılın en önemli sorunu olan küresel ısınmanın ekosistem için tehlike arz ettiğini söylemek mümkündür. Dolayısıyla miras mekânları zarar görme riski taşımakta ve bu durum özgün

kent dokularının devamlılığını zorlaştırmaktadır. Özellikle açık olmaları nedeniyle her türlü risk ile karşı karşıya kalan antik kentlerin de küresel ısınma etkisi altında bozulup yok olacağı, incinebileceği ve zarar göreceği aşikârdır. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı küresel ısınma etkisi altında antik kentlerin mevcut durumunu incelemektir.



Şekil 5. Antik kentlerin olumlu yönleri.

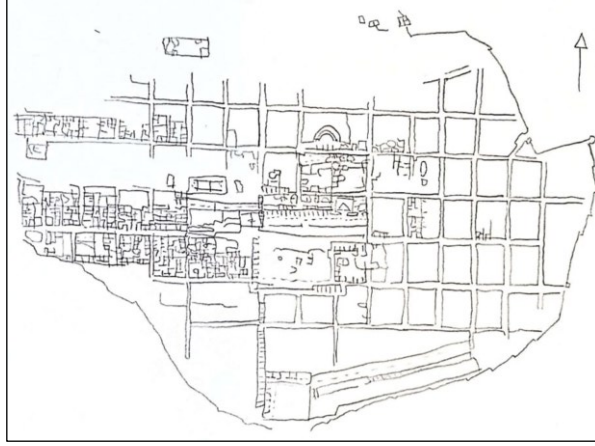
## 2. Materyal ve Yöntem

21. yüzyılın en önemli problemi durumuna gelen ve ekosistemin düzenini bozan küresel ısınmanın yeşil alanlar üzerinde etkisini incelemek için öncelikle çalışmanın materyali belirlenmiştir. Bu bağlamda araştırmanın kapsamını yeşil alanlar bilhassa da insanoğlunun yaşamından kesitler sunan antik kentler oluşturmaktadır. Bu kentler ilkçağlardan günümüze ulaşmış tarihi ve kültürel değere sahip yerleşim yerlerinden olup birer belge niteliğinde buldukları için korunarak gelecek kuşaklara aktarılmaları gerekmektedir. Ancak bu yerler, açık bir alanda mevcudiyetlerini sürdürdüklerinden küresel ısınma ve iklim değişikliği tehlikesi altında etkilenebilirlikleri artmakta ve muhafaza edilmeleri zorlaşmaktadır. Dolayısıyla küresel ısınma etkisi altında antik kentlerin mevcut durumlarının incelenmesi ve literatüre kazandırılması bir sonraki araştırmalara kaynaklık edeceğinden çalışma kapsamında öncelikle ele alınmıştır. Çalışma boyunca öncelikle teorik altyapıyı hazırlamak için kapsamlı bir literatür taraması yapılarak mevcut tezler, kitaplar ve dergiler taranmıştır. Ardından tüm insanlığın ortak mirası olan evrensel niteliğe sahip antik kentlerden Priene, Pergamon, Aspendos, Anavarza, Tarsos, Carnuntum, Stonehenge, Kolezyum, Pompeii örnekleri seçilmiştir. Seçilen bu örneklerin küresel ısınma sürecinde zarar görebilirlikleri, mevcut durumlarının incinebilirlikleri ve söz konusu sürecin etkileri analiz edilerek yorumlanmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda ülkemizdeki antik kentlerin sürdürülebilirliği için bir model geliştirilerek arkeopark önerisi sunulmuştur.

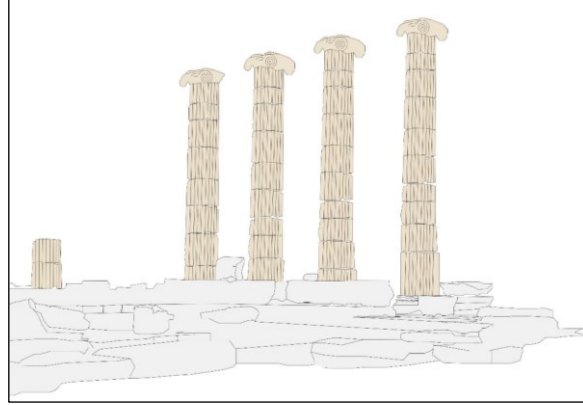
## 3. Bulgular

### 3.1. Priene

Kuruluşu yaklaşık MÖ 600'lere uzanan Priene bir Antik Yunan kenti olup Aydın ilinde yer almaktadır. Izgara plan sistemiyle kurulu kentte Priene Tiyatrosu, Agora, Athena Tapınağı, Demeter Kutsal Alanı ve Bouleuterion (Yönetim binası) konumlanmaktadır (Şekil 6-7) (Texier, 2002). Akdeniz iklim kuşağında bulunan yerleşimde yazın sıcak kışın ise yağışlı hava hâkimdir. Ahunbay (2009)'a göre malzemeler kışın soğuk havada büzülürken yazın sıcak havada genişlemektedir. Bu genişleme ve büzülme durumunda malzemenin yorulup yıprandığı gözlenmektedir. Dolayısıyla günümüzü ve geleceği tehdit eden küresel ısınma problemi nedeniyle yaz aylarında havanın sıcaklığı gittikçe artmaktadır. Bu bağlamda genişleme, asit yağmurları, büzülme ve nem artışı nedeniyle söz konusu kentte yer alan yapı elemanlarının malzemelerinde çiçeklenme, yıpranma ve mantar oluşumlarının gözleneceği aşikârdır.



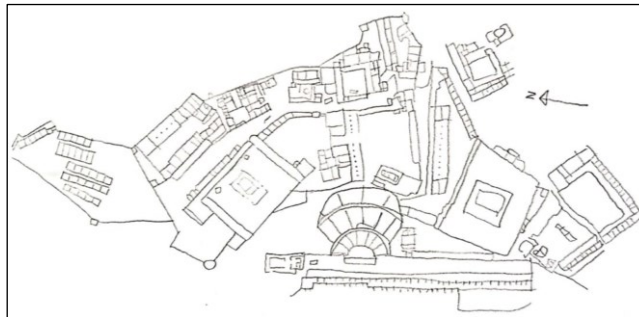
Şekil 6. Priene Antik Kentine ait ızgara plan (Yüksel (2012)'den uyarlanmıştır).



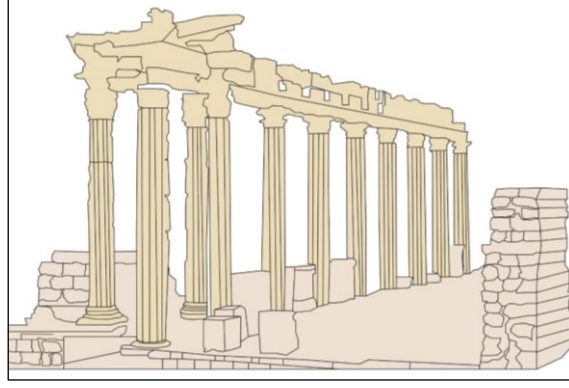
Şekil 7. Priene Antik Kentine ait sütunların eskiz çalışması (Anonim (2021a)'dan uyarlanmıştır).

### 3.2. Pergamon (Bergama)

Pergamon kentinin tarihsel gelişimi yaklaşık MÖ 300'lere uzanmakta olup yerleşim, Pergamon Krallığına başkentlik yapmıştır. Günümüzde İzmir ilinin Bergama ilçesinde yer almaktadır (Şekil 8-9). 2014 senesinde UNESCO Dünya Miras Listesi'ne alınmıştır. Bünyesinde konumlanan arkeolojik kalıntılar ve antik tiyatronun varlığı sayesinde bir açık hava müzesi niteliğindedir (Altınöz ve ark., 2016). Ancak iklim değişikliği ve küresel ısınmanın söz konusu yerleşimi de etkileyeceği bilinen bir gerçektir. Nitekim asit yağmurları ve aşırı sıcak hava sebebiyle açık havada sergilenen elemanlarda kopmaların, bozulmaların ve aşınmaların çoğalacağı; şiddetli rüzgârların bölgeye taşıdığı tozlar nedeniyle çeşitli mikroorganizmaların da yerleşime gelerek yapılara zarar vereceği öngörülmektedir.



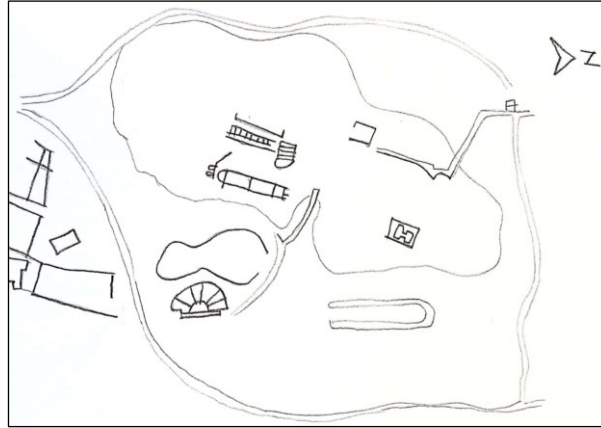
Şekil 8. Pergamon Antik Kentine ait yerleşim planı (Anonim (2022)'den uyarlanmıştır).



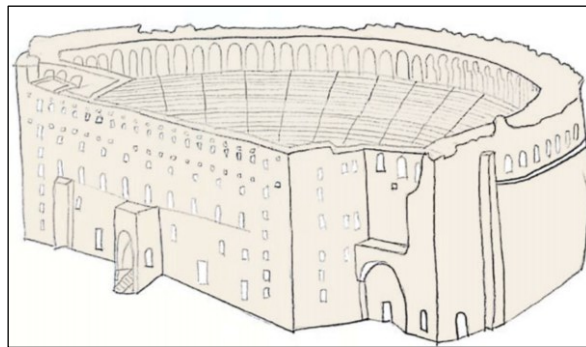
Şekil 9. Pergamon Antik Kentine ait sütunların eskiz çalışması (Anonim (2021b)'den uyarlanmıştır).

### 3.3. Aspendos

Aspendos antik kenti, Antalya ilinin Serik köyünde yer almakta olup yerleşimin tarihi yaklaşık MÖ 1200'lere dayanmaktadır (Şekil 10-11). Bünyesinde su kemerleri, akropol, tiyatro ve agora konumlanmaktadır (Kütükçüoğlu, 1962). Birer açık hava müzesi niteliğindeki kent yerli ve yabancı turistlerin ziyaretine açıktır. Nitekim kentte Hititler, Romalılar, Selekoslar gibi birçok medeniyet yaşadığından yerleşimin oldukça katmanlı bir yapısı vardır. Fakat günümüzde ciddi bir tehdit unsuru haline gelen küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkilerinden diğer kentler gibi Aspendos'unda etkilenmesi mümkündür. Bilhassa Antalya'da yaz aylarında aşırı sıcak hava hâkim olduğundan orman yangınlarının artacağı varsayılmaktadır. Bu durumun Aspendos için risk teşkil ettiği aşikâr olup atmosferde biriken zehirli gazların yerleşimin dokusuna zarar vereceği ve hasarlara yol açacağı öngörülmektedir. Bunun yanı sıra yapılarda bozulmaların, kopmaların, özgün malzemelerde tahribatların artacağı düşünülmektedir.



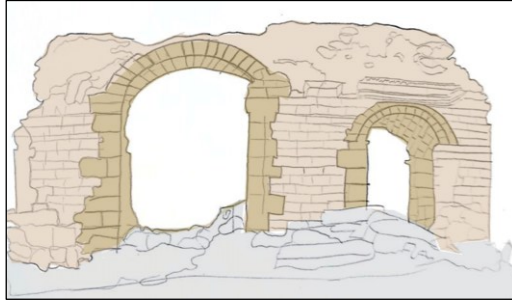
Şekil 10. Aspendos Antik Kentinin yerleşimine ait çalışma (Anonim (2019)'dan uyarlanmıştır).



Şekil 11. Aspendos Antik Kent Tiyatrosuna ait eskiz çalışması (Anonim (2013)'ten uyarlanmıştır).

### 3.4. Anavarza

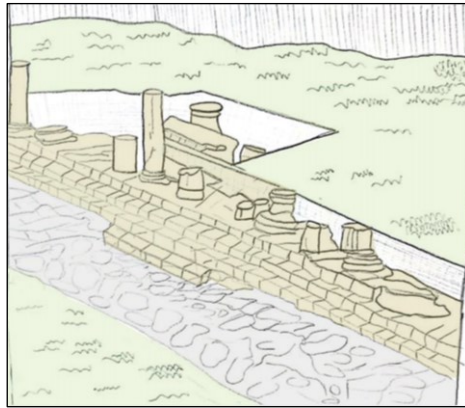
Adana ilinin Kozan ilçesinin Kilikya ovasında konumlanan Anavarza antik kenti, yaklaşık MÖ 19. yüzyılda kurulmuştur (Şekil 12). Dolayısıyla kentte pek çok toplumun varlığını sürdürdüğünü söylemek mümkündür. Yerleşimde tiyatro, sur duvarı, stadyum, kilise, zafer takı, hamam, sütunlu yol, su yolu, hamam, kale, kaya mezarı yer almaktadır (Durgun Şahin, 2019). Mevcutta ise mesire alanı olarak ziyaretçilerin kullanımına açıktır. Çeşitli toplumların hâkimiyet kurmasından ötürü oldukça kültürel ve tarihi bir değeri bulunmaktadır. Kentte yaz ayları aşırı sıcak ve kurak iken kış ayları yağışlı geçmektedir. Ancak günümüzde iklim değişikliğinin etkileri neticesinde yaz aylarını daha sıcak kış aylarını ise daha az yağışlı geçirmektedir. Bu nedenle bölgedeki kuraklığa bağlı olarak kentin toprağı çoraklaşmaya doğru gitmektedir. Bu durum yerleşimin oksijen miktarını düşürmektedir. İlaveten fazla ısınma sebebiyle yapı malzemelerindeki genleşme arttığından kimyasal ve fiziksel bozulmanın gözleneceği, özgün taşların yıpranacağı öngörülmektedir. Şiddetli rüzgârların çoğalmasıyla da taşınan mikroorganizmaların artacağı böylelikle taşlarda mantar ve çiçek oluşumunun daha sık yaşanacağı varsayılmaktadır.



Şekil 12. Anavarza Antik Kentine ait giriş kapısının eskizi (Anonim (2021c)'den uyarlanmıştır).

### 3.5. Tarsos (Tarsus)

Tarsos, Kydnos Nehri'nin geçtiği ovada kurulmuş olup burada ilk olarak 1650'li yıllarda Kizzuwatna Krallığı'nın yaşadığı bilinmektedir. Kentin ılıman bir iklime sahip olması, verimli topraklarının bulunması ve elverişli bir noktada konumlanması Hititler, Asurlular, Kue Krallığı, Persler, Kilikyalılar, Selefkoslar ve Romalılar gibi pek çok toplumun yaşamsal faaliyetlerini sürdürmesine imkân tanımıştır. Kent, Regma Gölü'nün varlığı sayesinde ticari faaliyetlerde oldukça ileri bir seviyeye ulaşmıştır (Deniz, 2021). Roma Dönemi'nde inşa edilen antik yol, 1993 senesinde keşfedilerek etrafı tellerle örülmüştür (Şekil 13). Ancak söz konusu bölgenin iklim değişikliği karşısında etkileneceği bilinen bir gerçektir. Özellikle artan karbondioksit seviyesi atmosferdeki havayı kirleteceğinden bu durumun yerleşimin doğal ve kültürel değerine zarar vereceği öngörülmektedir. İlaveten asit yağmurlarının gittikçe çoğalması antik yolda yer alan sütunlarda aşınmalara, koptmalara ve tahribata yol açacağı aşikârdır.

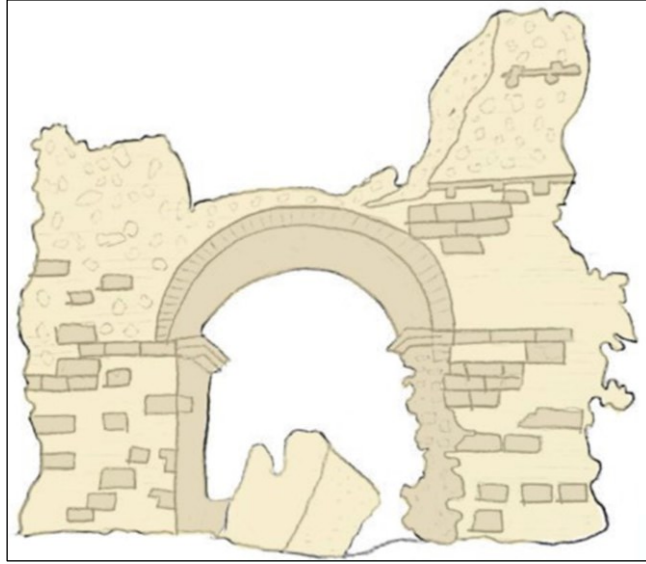


Şekil 13. Antik yolun eskizi (Deniz (2021)'den uyarlanmıştır).



### 3.6. Carnuntum

Avusturya'nın Petronell kentinde yer alan Carnuntum antik kentinin Romalılar tarafından MS 6 tarihinde kurulduğu bilinmektedir. Alanda konumlanan pek çok arkeolojik kalıntı 1904'te inşa edilen müzede sergilenmektedir (Şekil 14). Sur duvarları ise 2000'li yıllarda restore edilerek kentin merkezi tekrardan ayağa kaldırılmış ve mevcutta arkeopark işlevinde kullanılmaktadır (Wiseman, 2000). Tarihi çok eskilere uzandığından zengin bir kültürel değerinden söz etmek mümkündür. Petronell kenti, ılıman okyanusal iklime sahip olduğu için her mevsim bol yağış almakta ve bu nedenle yerleşimde ılık bir hava sıcaklığı görülmektedir. Ancak küresel ısınma ve beraberinde yaşanan iklim değişikliği nedeniyle Carnuntum'da konumlanan kalıntılarda fiziksel ile kimyasal bozulmanın meydana geleceği öngörülmektedir. İlerleyen süreçlerde sel felaketlerinin yaşanacağı ve bu durumdan kaynaklı alandaki eserlerin zarar göreceği varsayılmaktadır. Bu bağlamda yapı elemanlarında aşınma, kırılma, özgün dokuda değişme, malzemede genleşme gibi etkilerin gözleneceğini belirtmekte fayda vardır. İlaveten malzemelerde kopmaların ya da çimlenmelerin artacağı, müze binasına yerleşen mikroorganizmaların çoğalacağı aşikârdır. Nitekim alanda meydana gelecek herhangi bir tahribat kültürel mirasın korunmasını ve gelecek kuşaklara aktarılmasını zorlaştırmaktadır. Bu durumun ise kentsel ve toplumsal belleğin zarar görmesine yol açacağı muhtemeldir.



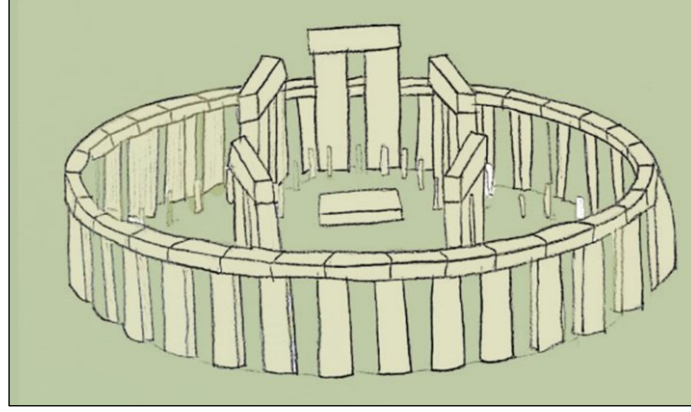
Şekil 14. Carnuntum Antik Kent kapısına ait eskiz çalışması (Anonim (2021d)'den uyarlanmıştır).

### 3.7. Stonehenge

İngiltere'nin Wiltshire kentinde yer alan Stonehenge, yaklaşık MÖ 3000'lerde kurulmuştur. Söz konusu alanda dikili taşlar bulunmaktadır. Bu taşlardan 30 tanesi sadece günümüze ulaşmış ve halka biçiminde konumlanmıştır (Şekil 15). Geriye kalan diğer taşların ise toprağın altında gömülü kaldığı söylenilmektedir. Taşların boyları 3 metrenin üzerinde olup ağırlıkları 25 tondur. Nitekim alan, 1986'da UNESCO tarafından Dünya Miras Listesi'ne alınmıştır. İngiltere'nin kültürel mirasının korunması ve sürdürülmesi gayesiyle kurulan English Heritage tarafından yönetilmektedir. 2000 ve 2009 yıllarında iki kez yönetim planı hazırlanırken temel amaç arkeolojik alanın ve doğal peyzajın korunarak gelecek kuşaklara aktarılması olmuştur. Özellikle yerleşimin önemi ve sürdürülebilir koruma yaklaşımları göz önüne alınarak bölgeye yönelik çözüm önerileri getirilmiştir. Bu kapsamda A303 ile A344 adlı yollar değiştirilmiştir (Young ve ark., 2009). Mevcutta Arkeopark olarak kullanılan alanda sergileme mekânları oluşturulmuştur. Kent, ılıman ve ıslak bir iklime sahip olduğundan güneşlenme süresi azdır ve kış ayları don görülme durumu fazladır. Dolayısıyla bu durumun ilerleyen süreçlerde iklim değişikliğine bağlı olarak daha da artacağı varsayılmaktadır. İlaveten iklimde meydana gelecek değişimlerin dikili taşların yapısında tahribata yol açacağı öngörülmektedir. Bunun yanı sıra yağışın miktarının farklılık göstermesinin yerleşimin toprağını



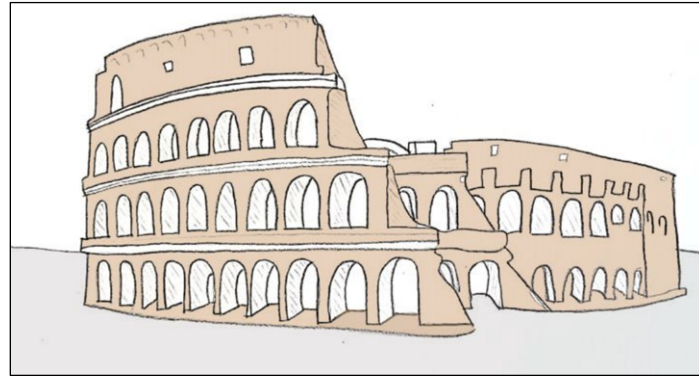
etkileyeceği bilinen bir gerçektir. Bu bağlamda kültürel peyzajın bozulacağından söz etmek mümkündür.



Şekil 15. Stonehenge yerleşiminde konumlanan sütun halkalarına ait eskiz çalışması (Anonim (2021e)'den uyarlanmıştır).

### 3.8. Kolezyum

Kolezyum, İtalya'nın başkenti Roma'da yer almakta olup MS 70'li yıllarda inşa edilmiştir (Şekil 16). Çeşitli gösterilerin, gladyatör dövüşlerinin ve kutlamalarının gerçekleştirildiği bir eğlence mekânı olarak fonksiyon görmüştür. İlerleyen zamanlarda ise konaklama, dini ve ticaret gibi çeşitli işlevlerde kullanılmıştır. Rönesans Döneminde pek çok taş buradan alınarak saray, köprü, bazilika yapılarının inşaatlarında kullanıldığı için yapı bozulmuştur. Dünyanın Yedi Harikasından biridir. Ayrıca yapının yakın konumunda ise MS 300'lerde inşa edilen Constantinus Kemerli bulunmaktadır. Roma'da Akdeniz ikliminin hâkim olmasından dolayı hava sıcaklığı ılıktır ve en fazla yağış sonbahar aylarında düşmektedir. Nitekim ekosistemi tehdit eden küresel ısınma problemine bağlı olarak ilerleyen süreçlerde kentte asit yağmurlarının artacağı bilinen bir gerçektir. Dolayısıyla Kolezyum'un da etkileneceği aşîkârdır. Bu bağlamda yapıda hasarların meydana geleceği, yapı malzemelerinin fiziksel ve kimyasal yapısının değişeceği, nem miktarındaki artış sebebiyle çiçeklenme ve mantar oluşumunun artacağı, yapı elemanlarında kopma ve aşınmaların çoğalacağı öngörülmektedir.

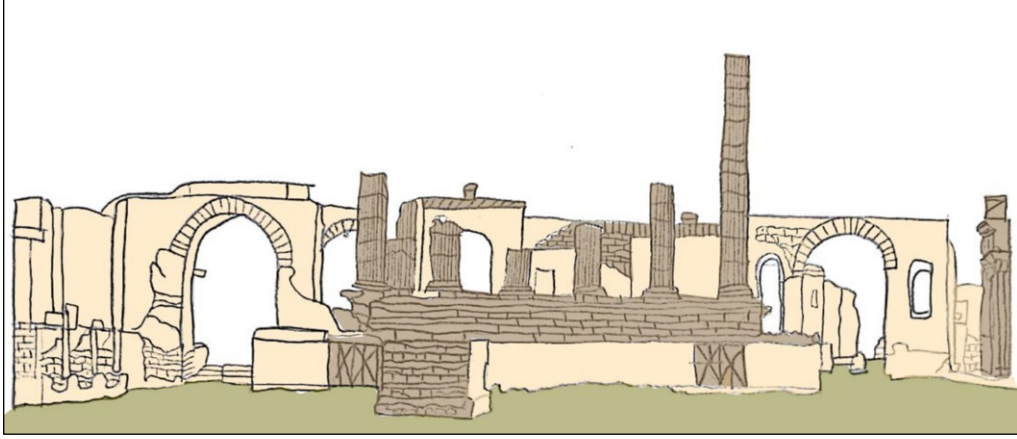


Şekil 16. Kolezyum Amfitiyatrosuna ait eskiz çalışması (Anonim (2021f)'den uyarlanmıştır).

### 3.9. Pompeii

İtalya'nın Napoli kentinin yakın konumunda yer alan Pompeii antik kenti, Antik Yunan, Etrüskler, Samnitler ve Romalılara ev sahipliği yapmıştır. Roma Devleti döneminde oldukça gelişme göstererek mimaride, ticarete ve sanatta ilerlemiştir. Ancak MS 79 senesinde Vezüv Yanardağı lavlarını söz konusu yerleşime püskürtünce alan yok olmuştur. 1748 yılında ise tesadüfen bulunarak gün yüzüne çıkartılsa da halen gömülü olan kısımlar vardır (Şekil 17). 1997 yılına UNESCO Dünya Miras Listesine girmiştir. Yerleşim, Akdeniz ikliminin etkisi altında olduğundan küresel ısınma

sebebiyle yaz aylarındaki sıcaklık derecesinin artacağı beklenmektedir (Camuffo, 2019). Dolayısıyla genleşme miktarının daha fazla olacağı düşünüldüğünde kalıntılardaki bozulmaların, tahribatların ve aşınmaların çoğalacağı öngörülmektedir. İlâveten kuraklık sebebiyle toprağın çoraklaşacağı düşünülmektedir. Ayrıca sanayileşme sonucu atmosferde biriken kirli gazlar asit yağmurlarının artmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda bu gazların kalıntıların kirlenmesine yol açacağı, fiziksel ile kimyasal yapılarını etkileyebileceği, yüzeylerinde çatlakların ve kırılmaların meydana geleceği bilinen bir gerçektir. Nitekim söz konusu etkiler neticesinde tarihi doku özgünlüğünü kaybetme riski taşımaktadır.



Şekil 17. Pompeii Antik Kentine ait eskiz çalışması (Anonim (2021g)'den uyarlanmıştır).

## 4. Tartışma ve Öneriler


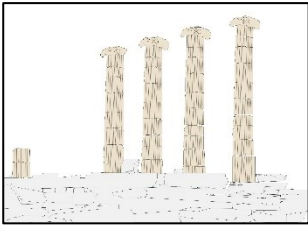

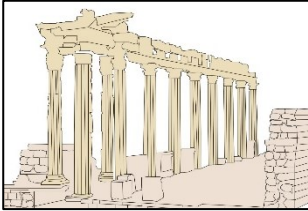

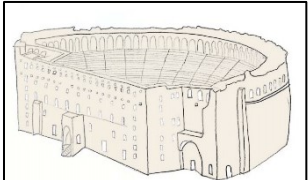

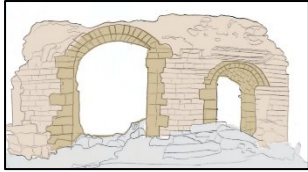
### 4.1. Tartışma

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarının 11. Maddesi, doğal ve kültürel değere sahip yerlerin muhafaza edilmesi belirtmektedir. Nitekim İtalya dünya üzerinde koruma faaliyetleri konusunda örnek teşkil etmektedir. Özellikle antik kentlere dair yaptıkları çalışmalar zaman içerisinde çeşitli nedenlerle değişerek şekillenmiştir. Bu bağlamda 1960'li yıllardan sonra tek yapı ölçeğinden bütüncül korumaya geçilmiş ve antik kentler kendi ulusal değerlerini içeren semboller olarak görülmüştür. İlâveten Söz konusu kentlerin sürdürülebilirliği ve muhafazası için uluslararası yasalar hazırlanmıştır. 1954 yılında Avrupa Kültür Sözleşmesi, 1956 yılında Arkeolojik Kazılarda Uygulanacak Uluslararası İlkeler Tavsiye Kararları, 1964 yılında Venedik Tüzüğü, 1976 yılında Nairobi Kararları, 1990 yılında Arkeolojik Miras Yönetimi, 1992 yılında Valetta İlkeleri çıkarılmıştır. Türkiye'de ise tarihi çevrelerin korunmasına dair ilk yasal düzenleme 1973 yılında Eski Eserler Kanunu ile olmuştur. Ardından 1983'te 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu hazırlanmıştır.

Bu bağlamda küresel ısınma etkisi altında antik kentlerin mevcut durumlarının analiz edildiği söz konusu çalışmada 5 tane ulusal 4 tane uluslararası olmak üzere toplam 9 tane örnek incelenmiştir. Tarihi ve kültürel değere sahip bu örneklerin küresel ısınma sürecinden nasıl etkilenecekleri yorumlanmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda genleşme, asit yağmurları, büzülme ve nem artışı nedeniyle Priene kentinde yer alan yapı elemanlarının malzemelerinde çiçeklenme, yıpranma ve mantar oluşumlarının gözleneceği varsayılmaktadır. Asit yağmurları ve aşırı sıcak hava sebebiyle Pergamon kentinin açık havada sergilenen elemanlarında kopmaların, bozulmaların ve aşınmaların çoğalacağı, şiddetli rüzgârların bölgeye taşıdığı tozlar nedeniyle çeşitli mikroorganizmaların yerleşime gelerek yapılara zarar vereceği öngörülmektedir. Antalya'da yaz aylarında aşırı sıcak hava hâkim olduğundan orman yangınlarının artacağı ve bu durumun Aspendos için risk teşkil ettiği aşikâr olup atmosferde biriken zehirli gazların yerleşimin dokusuna zarar vereceği ve hasarlara yol açacağı, bunun yanı sıra yapılarda bozulmaların, kopmaların, özgün malzemelerde tahribatların artacağı düşünülmektedir. Anavarza antik kentinde fazla ısınma sebebiyle yapı malzemelerinde kimyasal ve fiziksel bozulmanın gözleneceği, özgün taşların yıpranacağı, şiddetli rüzgârların çoğalmasıyla taşınan


mikroorganizmaların artacağı böylelikle taşlarda mantar ve çiçek oluşumunun daha sık yaşanacağı düşünülmektedir. Tarsos'ta asit yağmurlarının gittikçe çoğalmasının antik yolda yer alan sütunlarda aşınmalara, kopmalara ve tahribata yol açacağı aşikârdır. Carnuntum'da konumlanan kalıntılarda fiziksel ile kimyasal bozulmanın meydana geleceği, yapı elemanlarında aşınma, kırılma, özgün dokuda değişme, malzemede genişleme gibi etkilerin gözleneceğini, malzemelerde kopmaların ya da çimlenmelerin artacağı, müze binasına yerleşen mikroorganizmaların çoğalacağı öngörülmektedir. Stonehenge'de dikili taşların tahribata uğrayacağı, kültürel peyzajın bozulacağı muhtemeldir. Kolezyum'da hasarların meydana geleceği, yapı malzemelerinin fiziksel ve kimyasal yapısının değişeceği, nem miktarındaki artış sebebiyle çiçeklenme ve mantar oluşumunun artacağı, yapı elemanlarında kopma ve aşınmaların çoğalacağı varsayılmaktadır. Pompeii'deki kalıntılarda bozulmaların, tahribatların ve aşınmaların çoğalacağı, çatlakların ve kırılmaların meydana geleceği aşikârdır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Küresel ısınma etkisinde antik kentlerin mevcut durumlarının analizleri

İSİM	FOTOĞRAF	ESKİZLER	KÜRESEL ISINMANIN ETKİLERİ
PRIENE (MÖ 600)			<ul style="list-style-type: none"><li>• Malzemede bozulma ve yıpranma</li><li>• Sütunlarda kopma, çiçeklenme, tahribat, mantar oluşumu ve kırılma</li><li>• Özgün dokuda bozulmalar (UNESCO, 2007)</li></ul>
PERGAMON (MÖ 300)			<ul style="list-style-type: none"><li>• Malzemede kırılma ve kopma</li><li>• Mikroorganizmalardaki artış</li><li>• Toprak yapısında değişim</li><li>• Sütunlarda kopma, kırılma</li><li>• Yapı elemanlarının aşınması</li><li>• Toprak yapısında değişim</li><li>• Kültürel dokuda farklılaşma (Gençer, 2017)</li></ul>
ASPENDOS (MÖ 1200)			<ul style="list-style-type: none"><li>• Orman yangınları</li><li>• Tarihi dokuda hasar</li><li>• Kentsel bellekte kırılma</li><li>• Zemin ve yeraltı suyunda değişim</li><li>• Kuraklık, sel, nem döngüsünde değişim</li><li>• Özgün özelliklerin yitilmesi (UNESCO, 2007)</li></ul>
ANAVARZA (MÖ 19. yy)			<ul style="list-style-type: none"><li>• Çoraklaşma</li><li>• Malzemede kopma, ayrışma</li><li>• Taşlarda yıpranma</li><li>• Çiçeklenme ve mantar</li><li>• Tahribat</li><li>• Aşırı sıcak hava dalgasının varlığı (Gençer, 2017)</li></ul>



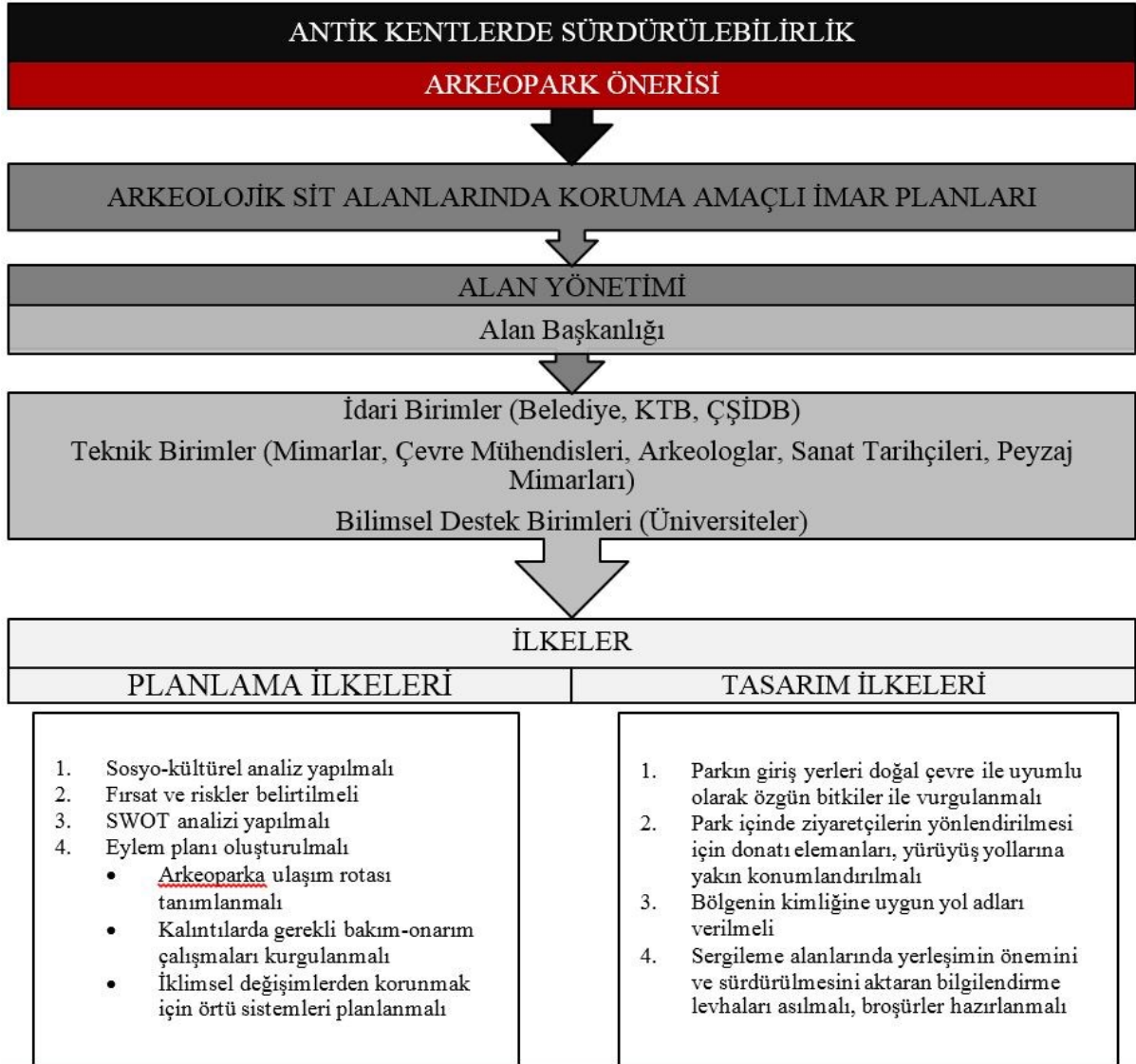
Çizelge 1. Küresel ısınma etkisinde antik kentlerin mevcut durumlarının analizleri (devam)

İSİM	FOTOĞRAF	ESKİZLER	KÜRESEL ISINMANIN ETKİLERİ
TARSOS (MÖ 1650)			<ul style="list-style-type: none"><li>• Sütunlarda aşınma</li><li>• Malzemede kopma</li><li>• Toprak yapısında değişim</li><li>• Tarihi dokuda zedelenme</li><li>• Özgün özelliklerin yitirilmesi</li><li>• Kültürel hafızada kayıp</li><li>• Kuraklık</li><li>• Kültürel ve doğal değerlerde değişim (Gençer, 2017)</li></ul>
CARNUNTUM (MS 6)			<ul style="list-style-type: none"><li>• Malzemelerde tahribat, kopma, çimlenme</li><li>• Bozulma, ayrışma</li><li>• Yıpranma</li><li>• Mikroorganizmaların artması (UNESCO, 2007)</li></ul>
STONEHENGE (MÖ 3000)			<ul style="list-style-type: none"><li>• Taşların özgün özelliklerini kaybetmesi</li><li>• Kuraklık, çoraklaşma</li><li>• Kültürel peyzajda bozulma</li><li>• Toprak yapısında değişim</li><li>• Don olaylarında artış (UNESCO, 2007)</li></ul>
KOLEZYUM (MS 70)			<ul style="list-style-type: none"><li>• Çimlenme artışı</li><li>• Malzemede değişim</li><li>• Cephelerde tahribat, bozulma</li><li>• Özgün dokunun bozulması</li><li>• Yüzeylerde kopma, kirlenme (UNESCO, 2007)</li></ul>
POMPEİ (-)			<ul style="list-style-type: none"><li>• Yapı elemanlarında genişleme</li><li>• Kalıntılarda çatlak oluşumu, kırılma</li><li>• Kalıntı yüzeylerinde kirlenme</li><li>• Kentsel bellekte kırılma (UNESCO, 2007)</li></ul>

## 4.2. Öneriler

Yürürlükte olan yasalar ile uluslararası hazırlanan tüzükler arasında bir koordine sağlanmadığından küresel ısınmaya dair kapsamlı çözüm önerileri sunulamamıştır. Bu bağlamda antik kentlerin korunarak gelecek kuşaklara aktarılması ve küresel ısınma sürecinden en az düzeyde etkilenmesi için ülkemiz özelinde akeopark önerisi geliştirilmiştir. Söz konusu arkeopark ile birçok kültürün izlerini taşıyan alanların muhafaza edilmesi hedeflenmiştir. Böylelikle sürdürülebilir biçimde kültürel mirasın korunması öngörülmektedir. Nitekim Almanya'da yer alan Xanten Arkeolojik Parkı bilinen en iyi arkeopark örneklerindedir. Bölge eski bir roma kalıntısı olup mimar, mühendis ve arkeologlar beraber görev alarak rekonstrüksiyonlar yapılmış ve bu kapsamda sergileme birimleri

oluşturulmuştur (Ruggieri Tricoli, 2015). Pavlov Arkeoparkı ise Çek Cumhuriyeti'nde konumlanmakta olup Palava Dağı'nın eteğine inşa edilmiştir. Söz konusu parkta ölü mezarları, Paleolitik Dönem'e ait miraslar ve çeşitli rekonstrüksiyonlar sergilenmektedir (Drobny, 2017). Ayrıca İtalya'da Milano'nun kuzeydoğusunda yer alan Brescia arkeoparkında kazı çalışmaları sonucu çıkarılan kalıntılar sergilenmiş ve ziyaretçilere gerekli bilgilendirmelerin yapılması için rehberler oluşturulmuştur. Özellikle kişilere ekmek yapmak, un dövmek ya da ateş yakmak gibi somut olmayan kültürel miras unsurları gösterilmiştir (Morandini, 2016). Bu bağlamda arkeolojik ve kültürel mirasın yönetilirken kentsel rekreasyonel çalışmaların birlikte yürütülmesi önem arz etmektedir. Dolayısıyla bu makale çalışmasında öneri olarak sunulan arkeopark önerisi, sit alanlarının koruma amaçlı imar faaliyetleri dahilinde ve alan yönetimi kapsamında hazırlanmıştır. Bu kapsamda planlama ve tasarım ilkeleri olmak üzere iki parametrede çözüm önerileri sıralanmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Antik kentlerin sürdürülebilirliği için ülkemize ait Arkeopark önerisinin organizasyon şeması.

Arkeoparkın sürekli bir biçimde işleyişi sağlanmalı ve bu kapsamda yönetsel çerçeve hazırlanmalıdır. Muhafaza etme ve geliştirme çalışmaları gerekli durumlarda yapılmalı, arkeolojik ve tarihi araştırmalar devam etmeli, mekânın kullanımı geliştirilmelidir. Söz konusu önerilerin ise idari, bilimsel ve teknik destek birimleri ile olacağı aşikârdır. Bu nedenle teknik birimde arkeologlar, peyzaj mimarları, mimarlar, sanat tarihçileri, çevre mühendisleri; bilimsel destek birimlerinde ise üniversiteler çeşitli vazifeler üstlenmelidir.

Planlama ilkeleri kapsamında bölgenin tarihi ile kültürel değerleri tespit edilmeli, yerleşimin sosyo-kültürel yapısı ortaya konmalı, fırsatlar ve riskler sıralanmalı, SWOT analizi hazırlanmalı ve eylem planı oluşturulmalıdır. Bu doğrultuda iklim değişikliğinden korunmak için üst örtü sistemleri kurgulanmalı, arkeoparka ulaşım rotası planlanmalı, kalıntılar için gerekli çalışmalar başlatılmalı, ziyaretçi noktaları belirlenmelidir. Çalışmayı Belediyeler, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Kültür ve Turizm Bakanlığı beraber koordine olup ortak yürütmelidir. Ayrıca Alan Başkanlığı kurularak bu kurulda sanat tarihçileri, mimarlar, peyzaj mimarları ve arkeologlar yer almalıdır. Özellikle tasarım çalışmalarında görev almalıdırlar.

Tasarım ilkeleri kapsamında yerin ruhu kavramı dâhilinde antik bölgenin doğal unsurları öne çıkarılmalıdır. Bu kapsamda parka giriş noktalarının doğal çevre ile uyumlu olmasına dikkat edilmeli ve özgün bitkiler ile kurgulanmalıdır. Bireylerin yönlendirilmesi için yürüyüş yolları ile donatı elemanları birbirlerine yakın yerleştirilmelidir. Yol isimleri yerleşimin kimliğine uygun olmalıdır. Sergileme alanlarına alanın önemini aktaran bilgilendirici levhalar asılmalı ve broşürler hazırlanmalıdır.

## 5. Sonuç

Yaklaşık 2000 yıllık tarihi geçmişini bulanan antik kentler, günümüze gelene kadar pek çok toplum tarafından kullanılmıştır. Mimari, kültürel ve tarihi nitelikleri sayesinde oldukça değerli yerleşim yerleridir. Söz konusu yerlerin zarar görmesi, tahrip edilmesi veya bozulması evrensel özelliklerinin kaybolmasına neden olmaktadır. Nitekim insanoğlunun geleneğini, göreneğini, kültürünü, hayat biçimini aktaran bu yerlerin korunarak gelecek kuşaklara aktarılması gerekmektedir. Ancak ekosistemi tehdit eden küresel ısınma riskinin söz konusu yerleşimleri de etkileyeceği bilinen bir gerçektir. Bu kapsamda şimdiye birçok önlem alınmış ve birtakım kuruluşlar oluşturulup yeni önlemlerin alınması için çeşitli sözleşme, rapor ya da bildirgeler hazırlanmış olsa da bunlar yeterli bir seviyede değildir. Dolayısıyla antik kentlerin sürdürülebilirliği için daha kapsamlı çözüm önerilerinin alınması önem arz etmektedir. Bu makale boyunca küresel ısınma etkisi altında antik kentlerin mevcut durumları analiz edilmeye çalışılarak 5 tane ulusal 4 tane de uluslararası olmak üzere toplam 9 tane örnek incelenmiştir. Tarihi ve kültürel değere sahip bu örneklerin küresel ısınma sürecinden nasıl etkilenmeleri yorumlanmaya çalışılmıştır. Ardından antik kentlerin korunarak gelecek kuşaklara aktarılması ve küresel ısınma sürecinden en az düzeyde etkilenmesi için ülkemiz özelinde arkeopark önerisi geliştirilmiştir. Koruma amaçlı imar faaliyetleri dâhilinde ve alan yönetimi kapsamında planlama ve tasarım ilkeleri olmak üzere iki parametrede çözümler sunulmuştur. Böylelikle antik kentlerin bireylerin ziyaretine açılması varsayılmıştır. Bu önerinin söz konusu kentlerin işlevlendirilmesine katkı sağlayacağı, yok olmalarının önüne geçileceği ve sürdürülebilirliklerine imkân tanıyacağı düşünülmektedir. Antik kentlerin özgün dokularıyla birlikte muhafaza edilip gelecek kuşaklara aktarılmasının ancak bu çözümler ile olacağı öngörülmektedir.

## Kaynakça

- Abrahamson, D. E. (1989). Global Warming: The Issue, Impacts, Responses. In D. E. Abrahamson (Ed.), *The Challenge of Global Warming* (pp. 3-34). Washington DC, USA: Island Press.
- Ahunbay, Z. (2009). *Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon*. İstanbul, Türkiye: YEM Kitabevi.
- Albek, E. A. (2013, Kasım). *Afet olarak küresel ısınma ve iklim değişiklikleri*. Uluslararası Türk Dünyası Çevre Sorunları Sempozyumu, Eskişehir.
- Altınöz, A. G., Binan, D., Pırson, F. (2016). Pergamon and it's multi-layered cultural landscape. In N. Ertürk, & Ö. Karakul (Eds.), *UNESCO World Heritage in Turkey 2016* (pp. 343-377). Ankara: UNESCO Türkiye Milli Komisyonu.
- Anderson, D. G., Bissett, T. G., Yerka, S. J., Wells, J. J., Kansa, E. C., Kansa, S. W., & White, D. A. (2017). Sea-level rise and archaeological site destruction: An example from the southeastern United States using DINAA, *PLOS One*, 12(11), e0188142. doi:10.1371/journal.pone.0188142
- Anonim. (2013). Aspendos tiyatrosu restorasyonu. Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: <https://kvmgm.ktb.gov.tr/TR-62699/aspndos-tiyatrosu-restorasyonu.html>



- Anonim. (2019). Aspendos, aşk ve konglomera. Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: <http://arkeogezi.blogspot.com/2019/05/aspndos-ask-ve-konglomera.html>
- Anonim. (2021a). Priene. Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: <https://en.wikipedia.org/wiki/Priene>
- Anonim. (2021b). Pergamon. Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Pergamon>
- Anonim. (2021c). Anavarza ören yeri - Adana. Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/adana/gezilecekyer/anavarza-kalesi>
- Anonim. (2021d). Petronell - Carnuntum. Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: <https://en.wikipedia.org/wiki/Petronell-Carnuntum>
- Anonim. (2021e). Stonehenge (Büyük Britanya, Tunç Çağı). Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: [https://www.mozaweb.com/tr/Extra-3B\\_goruntuler-Stonehenge\\_Buyuk\\_Britanya\\_Tunc\\_Cagi-12039](https://www.mozaweb.com/tr/Extra-3B_goruntuler-Stonehenge_Buyuk_Britanya_Tunc_Cagi-12039)
- Anonim. (2021f). Kolezyum. Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Kolezyum>
- Anonim. (2021g). Volkan,k patlama Antik Roma kenti Pompeii'yi nasıl korudu?. Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: <https://arkeofili.com/volkanik-patlama-antik-roma-kenti-pompeiiyi-nasil-korudu/>
- Anonim. (2022). Pergamon. Erişim tarihi: 31 Kasım 2021. Erişim adresi: <https://kulturenvanteri.com/tr/yer/ pergamon/#16/39.124817/27.184885>
- Camuffo, D. (2019). *Microclimate for Cultural Heritage*. Newyork, USA: Elsevier.
- Croce, S., & Vettorato, D. (2021). Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: A catalogue of solutions. *Sustainable Cities And Society*, 75, 103313. doi:10.1016/j.scs.2021.103313
- Deniz, M. (2021). *Kentsel bellek bağlamında Tarsus tarihi ticaret merkezinin değerlendirilmesi*. (Yüksek lisans tezi), Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Drobny, T. (2017). Archeopark Pavlov (stánek múz pod Pálavou). *Museologica Brunensia*, 6(1), 72-74.
- Dupont, L., & Van Eetvelde, V. (2013). Assessing the potential impacts of climate change on traditional landscapes and their heritage values on the local level: Case studies in the Dender basin in Flanders, Belgium. *Land Use Policy*, 35, 179-191. doi:10.1016/j.landusepol.2013.05.010
- Durgun Şahin, Y. (2019). *Ovalık Kilikya bölgesi Roma antik kentlerinin mekân dizim yöntemi ile analizi*. (Doktora tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Erol, O. (1992). Türkiye'de deniz düzeyi yükselmesinin geçmişte ve gelecekteki etkileri, bu yönden alınması gerekli önlemler. *İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Coğrafya Enstitüsü Bülteni*, 9, 21-43. [https://cdn.istanbul.edu.tr/FileHandler2.ashx?f=bulten\\_92.pdf](https://cdn.istanbul.edu.tr/FileHandler2.ashx?f=bulten_92.pdf)
- Fatorić, S., E. & Seekamp, E. (2017). Are cultural heritage and resources threatened by climate change? A systematic literature review. *Climate Change*, 142(1-2), 227-254. doi:10.1007/s10584-017-1929-9
- Gençer, C. İ. (2017). Kültürel mirasın korunmasında iklim değişikliğinin oluşturduğu tehditler. *Mimar.ist*, 58, 24-30.
- Jamali, T. (2007). *Ekolojik Vergiler*. Ankara, Türkiye: Yaklaşım Yayınları.
- Kütükçüoğlu, M. (1962). *Güney Anadolu Tarihi Su Tesisleri Antalya Havzası*. Ankara, Türkiye: T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Lachowycz, K., Jones, A. P. (2013). Towards a better understanding of the relationship between greenspace and health: Development of a theoretical framework. *Landscape and Urban Planning*, 118, 62-69. doi:10.1016/j.landurbplan.2012.10.012
- Moberg, A., Sonechkin, D. M., Holmgren, K., Datsenko, N. M., & Karlén, W. (2005). NOAA/WDS Paleoclimatology - 2005 2,000-Year Northern Hemisphere Temperature Reconstruction. *Nature*, 433(7026). 613-617. doi:10.25921/gbqt-n927
- Morandini, F. (2016, December). *Brescia-Brixia (Italy). Travel across the ancient landscapes: Museum of the City and its archaeological area between research and enhancement*. The 2nd

- Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Greek Chapter (CAA-GR), Athens, Greece.
- Özdemir, M. A. (2004). İklim değişimleri ve uygarlık üzerindeki yansımalarına ilişkin bazı örnekler. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(2), 173-192.
- REC. (2006). *İklim Değişikliği Görüşmelerinde Müzakerecinin El Kitabı*. Ankara, Türkiye: Bölgesel Çevre Merkezi REC Türkiye.
- Rezafar, A. (2011). *Farklı iklim kuşaklarında yer alan eko-kentlerin tasarım ilkelerinin derlenmesi ve Türkiye için ekolojik kentsel tasarım ön çalışma önerisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Robrecht, H. (2015). Climate change and the city. <http://www.aragonvalley.com/en/climate-change-cities/> Erişim Tarihi: 05.11.2021
- Ruggieri Tricoli, M. C. (2015). Lo Xanten Archäologischer Park: Un Caso Di Sperimentazione, *Palermo*, 2005, pp. 105-113.
- Schneider, S., & Sarukhan, J. (2001). Overview of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change (Report No. 75). Climate change 2001 Web sitesinden erişildi: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII\\_TAR\\_full\\_report-2.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report-2.pdf)
- Texier, C. (2002), *Küçük Asya, Coğrafyası, Tarihi ve Arkeolojisi*, (Çev: Ali Suad). Ankara, Türkiye: Enformasyon ve Dökümantasyon Hizmetleri Vakfı Yayınları.
- Türkeş, M., Sümer, U. M. & Çetiner, G. (2000). Küresel İklim Değişikliği ve Olası Etkileri, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları. 13 Nisan. İstanbul: Hava Yönetimi Daire Başkanlığı.
- UNESCO. (2007). World Heritage Reports 22 (Report No. 22). Climate change and World heritage Web sitesinden erişildi: [https://whc.unesco.org/documents/publi\\_wh\\_papers\\_22\\_en.pdf](https://whc.unesco.org/documents/publi_wh_papers_22_en.pdf)
- Vural, G. (2016). *Fiziki özellikleri ve beşeri etkileriyle küçük buzul çağı (1300 -1850)*. (Yüksek lisans tezi) İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, D., Öztürk, T., & Kurnaz, L. (2015, Mayıs). *İklim değişikliğinin kültürel miras üzerindeki etkisi: Efes Antik Kenti örneği*. Ulusal Müzecilik Sempozyumu, İstanbul.
- Young, C., Chadburn, A., & Bedu, I. (2009). *Stonehenge World Heritage Site Management Plan*. London, England: English Heritage.
- Yüksel, E. (2012). *17. yüzyıl sonu, 18. yüzyıl ortası ve 19. yüzyıl başında yabancı seyyahların gözünden Batı Anadolu antik kentleri*. (Yüksek lisans tezi), Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aydın.
- Wiseman, J. (2000). INSIGHT: Roman life on the Danube. *Archaeology*, 53(1), 10-12.



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Dış Mekân Gölgeleme Elemanlarının Termal Konfor Koşullarına Etkilerinin Değerlendirilmesi

Fatih CANAN, Hande Büşra GEYİKLİ\*

Konya Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 42150, Konya, Türkiye  
Fatih CANAN, ORCID No: 0000-0003-4469-1993, Hande Büşra GEYİKLİ, ORCID No: 0000-0003-2970-9921

\*Sorumlu yazar e-posta: hbkobyay@ktun.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 06.12.2022  
Kabul: 23.02.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1215174

#### Anahtar Kelimeler

Gölgeleme elemanları,  
PET,  
Termal konfor

**Öz:** Çalışmada, kent ortamında iklimi ve kullanıcının termal konfor koşullarını yaz döneminde iyileştirmede önemli fonksiyonu olan gölgeleme elemanları ele alınmakta ve Selçuk Üniversitesi yerleşkesinde altı farklı alanda seçilmiş olan doğal ve yapay gölge elemanlarının dış ortam termal konfor koşullarına etkilerinin ortaya konması amaçlanmaktadır. Tipik bir yaz gününde, bu mekânlarda gölgeleme elemanlarının dış ortam termal konfor koşullarına etkisinin belirlenmesi için kısa süreli yerinde mikro-meteorolojik ölçümler yapılmıştır. Mikro-meteorolojik ölçümlerle; anlık hava sıcaklığı ( $T_a$ , °C), bağıl nem (RH, %), rüzgâr hızı (WS, m/sn) ve ortalama radyant sıcaklık (MRT, °C) değerleri gün içindeki en yüksek sıcaklık değerlerine sahip 13:30-15:30 saat aralığında belirlenmiştir. Gölgeleme elemanlarının altında ve yakınlarında elde edilecek mikro-meteorolojik değerler kıyaslanarak gölgeleme elemanlarının, iklimi ve dış ortam termal konfor koşullarına olan etkisi tartışmaya açılmıştır. Dış ortam termal konfor koşulları bu çalışmada PET (Fizyolojik eşdeğer sıcaklık) indisi ile hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda en iyi termal konfor koşulları sağlayan gölge elemanlarının Amerikan sarmaşığı ve söğüt ağacı olduğu saptanmıştır.

### Evaluation of the Outdoor Shading Devices Effects on Thermal Comfort Conditions

#### Article Info

Received: 06.12.2022  
Accepted: 23.02.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1215174

#### Keywords

PET,  
Shading devices,  
Thermal comfort

**Abstract:** In the study, shading elements, which have an important function in improving the microclimate in the urban environment and the thermal comfort conditions of the user in the summer period, are discussed. It is aimed to reveal the effects of natural and artificial shade elements selected in six different areas on the outdoor thermal comfort conditions in the Selçuk University campus. On a typical summer day, short-term in situ micro-meteorological measurements were made to determine the effect of shading elements on outdoor thermal comfort conditions in these spaces. With micro-meteorological measurements, air temperature ( $T_a$ , °C), relative humidity (RH, %), wind speed (WS, m/sn) and mean radiant temperature (MRT, °C) values were determined between 13:30-15:30 hours, which has the highest temperature values during the day. By comparing the micro-meteorological values to be obtained under and near the shading elements, the effect of shading elements on the microclimate and outdoor thermal comfort conditions has been discussed. Outdoor thermal comfort conditions were calculated with PET (physiological equivalent temperature) index in this study. As a result of the study, it was determined that the shade elements that provide the best thermal comfort conditions are American ivy and willow tree.

## 1. Giriş

Özellikle son yıllarda yoğun kentleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan kentsel ısı adası etkisi, kentliler için problemler oluşturmaktadır. Binalarda ısıtma ve soğutma için harcanan enerji, kaynakların yoğun kullanımı, yaşam kalitesinin düşmesi ve bunlara bağlı olarak insan sağlığının tehdit altına girmesi başlıca problemler olarak sıralanabilmektedir. Ne yazık ki yeryüzünde çoğu kent bu olumsuz iklimsel fenomenle karşı karşıyadır. Özellikle yapılaşma yoğunluklarının bilinçsizce artırıldığı kentlerde ısı adası etkisiyle mücadele etmek güçleşmektedir. İklim kuşağına ve kentlerin yapısal yoğunluklarına bağlı olarak ısı adasının etkisi değişkenlik gösterebilmektedir.

Sürdürülebilir kentsel planlama yaklaşımlarında kentsel ısı adası oluşumunun kontrol altına alınması ve bu etkinin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Makro ölçekte kent içinde yapısal yoğunluklar, sert zemin ve yeşil doku yoğunluğu belli bir denge içinde tutulmaya çalışılmaktadır. Mevcut bir kent dokusunda müdahaleler yapılması hedeflendiğinde veya yeni kentsel alanların planlanması öngörüldüğünde, planlama-tasarım aşamalarında oluşabilecek mikroklimatik koşulların tahmin edilmesi önem arz etmektedir. Simülasyon programlarının kullanımı bu ön planlama/tasarım aşamalarında gerçeğe yakın bir şekilde, oluşması muhtemel mikroklimatik koşullar ile ilgili ön bilgiler elde edilebilmektedir (Noro & Lazzarin, 2015; Lyu ve ark., 2019; Fahed ve ark., 2020; Karimi ve ark., 2020; Jia & Wang, 2021; Salvati ve ark., 2022). Oluşacak mikroklima ile ilgili bilgi sahibi olabilmek ve kaba hatalardan kaçınabilmek için aynı kentte veya benzer iklim bölgesinde olan bir kentte yapılmış çeşitli bilimsel çalışmalardan da faydalanılabilmektedir. Bu çalışmaların bir kısmında, yapısal çevreyi oluşturan çeşitli parametrelerin kent iklimi üzerine olan etkileri ele alınmış olup, kent plancılara, mimarlara ve peyzaj mimarlarına çeşitli ipuçları verebilmektedir. Belirtilen bu kapsam içerisinde Oke tarafından, ortalama gökyüzü açıklık değerlerine (SVF) bağlı olarak kentsel ısı adası etkisinin belirlendiği çalışma, sunulacak iyi bir örnektir (Oke, 1987). Yine kent iklimi temalı bilimsel çalışmalarda, bilgi elde etme yöntemleri, yerinde kısa süreli mikro-meteorolojik ölçümler, uzun süreli meteorolojik ölçümler, uydu verileri veya yine simülasyon programları yardımı ile elde edilmektedir. Bu konuda son yıllarda geniş bir literatür oluşmuştur (de Moraes ve ark., 2017; Crank ve ark., 2018; Farhadi ve ark., 2019; Li ve ark., 2020).

Mevcut çalışmada, kent ortamında mikroklimayı ve kullanıcının termal konfor koşullarını yaz döneminde iyileştirmede önemli fonksiyonu olan gölgeleme elemanları ele alınmıştır. Hava sıcaklık değerlerinin yüksek seyrettiği yaz aylarında, kent sakinleri gölge alan kentsel dış mekânlarda vakit geçirmeyi tercih etmektedir. Kentsel dış mekânlar çeşitlilik gösterebilir; bunlar park, meydan, yaya yolu olabilir. Kent ortamında bu dış mekânlarda kullanıcı memnuniyeti; yer seçimi, işlev, estetik gibi çeşitli ölçütler yanında, bu mekânların sundukları termal çevreye de bağlıdır (Canan ve ark., 2019).

Dış mekânların gölgelendirilmesi, ağaç ve çeşitli bitkilerle doğal bir şekilde sağlanabileceği gibi yapay bir şekilde de sağlanabilmektedir. Yapay gölgeleme; bina cepheleri, ahşap, tekstil, cam, polikarbon, metal veya betonarme gibi malzemelerden üretilmiş elamanlarla sağlanabilmektedir. Kanopi olarak da adlandırılabilen gölgeleme elemanlarının, mikroklimayı ve dolayısıyla da termal konforu iyileştirme etkisi, yakın çevrenin fiziksel özelliklerine de bağlıdır. Zemin döşeme malzemesinin özellikleri, kanopinin boyutu, belli bir noktadan gökyüzü açıklık değerleri (SVF) ve konumlandırma gibi temel parametreler mikroklimatik koşulları etkilemektedir. Bu çalışmada iki türden kanopi ele alınmıştır.

1-Ağaç ve bitkisel unsurdan oluşan doğal kanopiler.

2-Çeşitli malzemelerle üretilmiş yapay kanopiler.

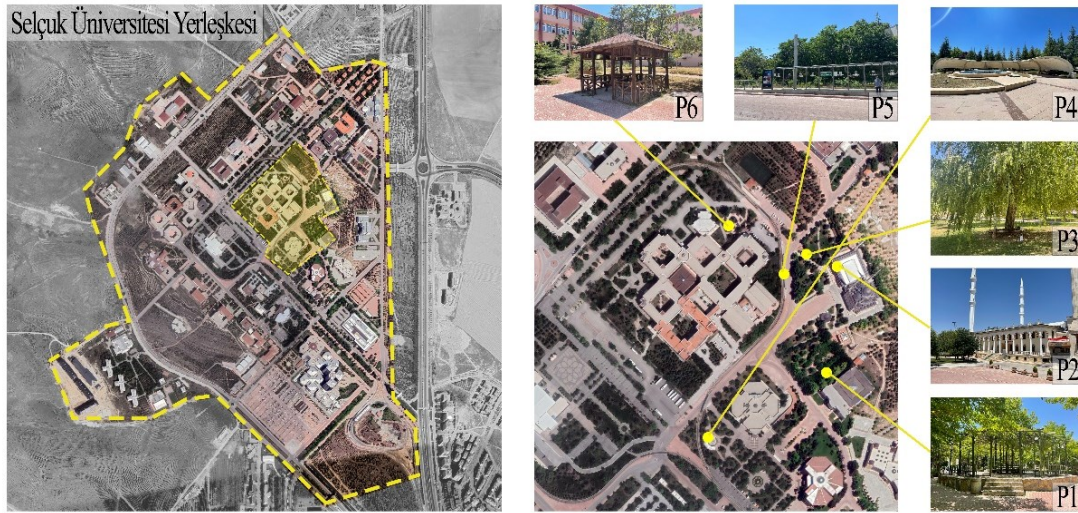
Gölgeleme elemanı türünün seçiminde, kentsel mekânın sunduğu olanaklar etkili olmaktadır. Ağaç ve çeşitli bitkilerle sağlanan doğal gölgeleme olanakları, kentin içinde yer aldığı iklimsel kısıtlar ve doğal koşullara göre şekillenmektedir. Yine dış mekânın kent içindeki yeri, alanı ve kullanım özellikleri de gölgeleme elemanı türünün seçiminde dikkate alınmaktadır.

Çalışmada, Selçuk Üniversitesi yerleşkesi içinde bulunan 6 farklı gölgeleme elemanının, gölgeleme elemanı altında ve gölgeleme elemanı dışında yapılan mikro-meteorolojik ölçümler ile termal konfora etkisinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Aynı zamanda, dış ortamda yer alan gölge mekânlarının termal çevrelerini ne şekilde değiştirebilecekleri konusunda bilgilerin elde edilmesi hedeflenmektedir. Elde edilecek bu bilgilerin benzer tasarımlarda yol gösterici olabileceği düşünülmektedir.



## 2. Materyal ve Yöntem

Farklı özellikteki gölgeleme elemanlarının dış mekân termal konfor koşullarına etkilerinin belirlenmesi amacıyla Konya'da bulunan Selçuk Üniversitesi Yerleşkesi içinde 6 farklı alan seçilerek mikro-meteorolojik ölçümlere dayalı bir çalışma yürütülmüştür. Seçilen bu alanlardan ilki (P1), ahşap strüktür ve Amerikan sarmaşıkları ile kaplı olan Bilmer Parkı içindeki oturma-dinlenme alanıdır. Bu alanda ahşap strüktür ve sarmaşıkların gölgeleme etkisi ortaya konulmuştur. 2. alan (P2), hemen Bilmer Parkı yanında yer alan, üniversitenin sıklıkla kullandığı Üniversite Cami revaklarıdır. Bu revaklar özellikle namaz vakitlerinde cami iç mekânı dışında da sıklıkla kullanılan betondan yapılmış, gölge alan sağlayan yarı açık bir mekândır. 3. alan (P3), caminin yanında yer alan park içindeki bir söğüt ağacının altıdır. Bu ağaç altında oturma birimleri yer almakta ve üniversiteli tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bölgede hem üst örtü hem de zemin yeşil dokudan oluşmaktadır. 4. alan (P4), üniversite sosyal tesislerinin yanında bulunan asma-germe sisteme sahip altında oturma birimleri yer alan yarı açık mekândır. Bu mekân özellikle öğle vakitlerinde yemek öncesi ve sonrasında üniversiteli tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. 5. alan (P5), Mühendislik Fakültesi tramvay durağıdır. Bu durak özellikle okul dönemi içinde üniversiteli tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Bu durağın üst örtüsü şeffaf polikarbon ve çelik malzemeden oluşmaktadır. Seçilen son alan ise (P6), Mühendislik Fakültesi yanında, girişte yer alan ahşap malzemeli ve üst örtülü kamelyalardır. Bu kamelyalar öğrenciler tarafından vakit geçirmek için tercih edilmektedir. Seçilen tüm alanların yerleşke içindeki konumları (Şekil 1) ve detayları (Çizelge 1) aşağıda yer almaktadır.



Şekil 1. Seçilen gölgeleme elemanlarının yerleşke içindeki konumları ve görselleri.

Çizelge 1. Seçilen gölgeleme elemanlarının konum ve malzeme detayları

Nokta adı	Durum	Konum	Malzeme
P1a	Gölge altı	Bilmer parkı	Ahşap strüktür / Amerikan sarmaşığı
P1b	Gölge dışı	Bilmer parkı	
P2a	Gölge altı	Üniversite Cami	Betonarme
P2b	Gölge dışı	Üniversite Cami	
P3a	Gölge altı	Üniversite Cami yanı	Yeşil yapraklı üst örtü (ağaç)
P3b	Gölge dışı	Üniversite Cami yanı	
P4a	Gölge altı	Sosyal tesis	Asma-germe / Tekstil malzemesi
P4b	Gölge dışı	Sosyal tesis	
P4c	Gölge altı	Sosyal tesis yanı	Çim zemin ve yeşil yapraklı üst örtü
P5a	Gölge altı	Müh. Fakültesi tramvay durağı	Polikarbon ve çelik malzeme karışımı
P5b	Gölge dışı	Müh. Fakültesi tramvay durağı	
P6a	Gölge altı	Müh. Fakültesi ahşap kamelya	Ahşap malzeme
P6b	Gölge dışı	Müh. Fakültesi ahşap kamelya	



Gölgeleme elemanlarının termal konfora etkisinin tespit edilebilmesi için, seçilen 6 farklı alanda toplamda 13 noktada taşınabilir Delta ohm hD32.3 cihazı (Şekil 2) ile mikro-meteorolojik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler ile hava sıcaklığı (Ta), rüzgâr hızı (Ws), bağıl nem (RH) ve ortalama radyan sıcaklık (MRT) değerleri bulunmuştur. Ölçümler birbirine yakın meteorolojik değerlere sahip iki gün içinde yapılmış, ilk üç alanda ölçümler 28.07.2022 tarihinde, diğer üç alandaki ölçümler ise 29.07.2022 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler gün içinde insanların sıklıkla kullandığı ve yoğun termal stres altında kaldıkları 13:30-15:30 saatleri arasında yapılmıştır. Gölgeleme elemanlarının termal konfor koşullarına etkisini kıyaslayabilmek için ölçümler 15 dakika gölgeleme elemanı altında, 5 dakika ise gölgeleme elemanının hemen yanında üst örtü dışında alınmıştır. Bu yaklaşımla, gölgeleme elemanının aynı ortam içinde meydana getirdiği gölgelemenin ne derece etkili olduğu saptanmaya çalışılmıştır.

Cihaz problemleri yerden 60 cm yükseklikte (Şekil 2) olacak şekilde oturan bir bireye göre ayarlanmıştır (ISO 7726, 1998). 30 saniyede bir alınan ölçümler cihaz tarafından kaydedilmiştir. Elde edilen Ta (hava sıcaklığı), RH (bağıl nem), Ws (rüzgâr hızı) ve MRT (ortalama radyan sıcaklık) gibi temel parametrelerin ortalama değerleri esas alınarak karşılaştırmalar yapılmış ve çeşitli gölgeleme elemanları arasındaki farklar anlaşılmasına çalışılmıştır. Aynı zamanda Konya'nın anlık hava durumu değerleri de gözlemlenmiştir. Bu sayede çalışma saatlerinin ve günlerinin hava koşulları bakımından denklik durumları kontrol edilebilmiştir. 28.07.2022 tarihinde saat 13:40'ta ölçülen hava sıcaklığı 31 °C iken, bu değer saat 13:50'de 32 °C'ye ulaşmış ve saat 16:00'ya kadar aynı şekilde takip etmiştir. 29.07.2022 tarihinde ise 13:30-14:15 arasında hava sıcaklığı değeri 32 °C, 14:15-15:30 saatleri arasında 33 °C'dir.

En önemli karşılaştırmalar termal konfor koşullarının belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bunun için PET indisi kullanılmıştır. PET (Fizyolojik Eşdeğer Sıcaklık), dış ortamdaki termal konforu tespit edebilmek için en çok kullanılan indistir (Johansson ve ark., 2014; Potchter ve ark., 2018).



Şekil 2. Bilmer parkı gölgeleme elemanı altında (p1a) ve gölgeleme elemanı dışında (p1b) yapılan mikro-meteorolojik ölçümler.

PET, yerinde mikro-meteorolojik ölçümlerden elde edilen değerler ve kişisel verilerin birlikte kullanımı ile hesaplanabilmektedir. Cihaz ölçümü ile elde edilen yere özgü Ta, Ws, RH, MRT değerleri ile kişinin yaşı, cinsiyeti, boyu, ağırlığı, yaptığı aktivite ve kıyafet durumları gibi kişisel veriler kullanılmaktadır. Bu çalışmada erkekler için; 23 yaşında, 178 cm boyunda ve 75 kg ağırlığında; kadınlar için ise; 22 yaşında, 164 cm boyunda, 58 kg ağırlığında kişiler genel kabul olarak alınmıştır. Erkekler için Clo değeri (giysilerin ısı direnç katsayısı) 0.40; kadınlar için ise 0.50 alınmıştır. Bu değerler yerleşkede kişilerin tipik yaz kıyafetlerine göre belirlenmiştir (Canan ve ark., 2020). PET indisi ile termal konfor hesapları kişilerin oturur vaziyette oldukları kabulü ile yapılmıştır. Bu durumda Met değeri (metabolic rate) 58 W/m<sup>2</sup> alınmıştır.

PET indisi dışında TOCI (Turkish Outdoor Comfort Index) de hesaplanmıştır (Denklem 1). Bu indis, Canan ve arkadaşları tarafından 2020 yılında yapılan bir çalışmada Konya kenti için belirlenen özgün bir termal konfor indisidir. Elde edilen TOCI değerleri ile de PPD<sub>yaz</sub> değerleri (Yaz dönemi için termal ortamdaki memnuniyetsizlik oranı) hesaplanmıştır (Denklem 2). Söz konusu PPD değerleri de yine Konya için belirlenmiş denklem ile hesaplanmıştır (Canan ve ark., 2019; Canan ve ark., 2020). TOCI verilerinin değerlendirilmesi aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 2).

### TOCI yaz dönemi

$$= -4.142 - 0.210 * Ws - 0.005 * Age + 0.037 * MRT + 0.095 * Ta + 0.316 * ICL + 0.014 * M \quad (1)$$

$$PPD yaz dönemi = 100 - 89.74 EXP(-0.10 TOCI4 - 0.20 TOCI2) \quad (2)$$

Çizelge 2. TOCI değerlerinin termal algı karşılıkları

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Çok soğuk	Soğuk	Serin/Biraz soğuk	Nötral / konforlu	Ilık/biraz sıcak	Sıcak	Çok sıcak

Çalışmanın sonucunda 6 farklı bölgede gölgeleme elemanı altında ve gölgeleme elemanı dışında alınan ortalama PET, TOCI ve PPD değerleri arasında karşılaştırmalar yapılarak çeşitli gölgeleme elemanlarının dış ortamda termal konfora etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Cihazla yerinde yapılan mikro-meteorolojik ölçümler ve Rayman yazılımı ile PET indisinin hesaplanması sonrasında bu verilerin ortalamaları alınarak aşağıdaki çizelge oluşturulmuştur (Çizelge 3). Ortalama değerler, 28 ve 29 Temmuz 2022 tarihinde saat 13:30-15:30 saatleri arasında 6 farklı alandan alınan ortalama değerlerden elde edilmiştir.

Çizelge 3. Elde edilen tüm verilerin 6 farklı alan ve 13 nokta için ortalamaları

Ortalama veriler	P1a. Bilmer Parkı Gölgesi	P1b. Bilmer Parkı Gölge yok	P2a. Cami Revağı Gölgesi	P2b. Cami Revağı Gölge yok	P3a. Söğüt Altı Gölgesi	P3b. Söğüt Altı Gölge yok	P4a. Asma Germe Gölgesi	P4b. Asma Germe Gölge yok	P4c. Asma Germe Ağaç Altı	P5a. Tra. Durağı Gölgesi	P5b. Tra. Durağı Gölge yok	P6a. Kam. Altı Gölgesi	P6b. Kam. Altı Gölge yok
T <sub>a</sub> (°C)	29.85	33.69	32.25	34.48	30.11	32.85	32.69	36.27	31.63	34.93	36.02	34.48	35.43
RH (%)	24.23	19.98	20.52	17.19	24.27	18.93	15.09	11.49	14.72	11.88	10.09	11.79	10.58
Ws (m/s)	0.52	0.78	0.58	1.30	0.96	1.18	0.71	0.98	0.73	1.16	1.57	0.64	1.25
MRT (°C)	35.65	70.25	50.03	76.84	37.56	74.82	42.38	73.87	37.03	52.84	71.06	40.45	79.62
PPD <sub>yaz</sub> (%)	99.466	100.00	99.978	100.00	99.468	100.00	99.343	99.864	99.211	99.569	99.804	99.395	99.879
TOCI <sub>yaz</sub>	0.74	2.33	1.49	2.54	0.74	2.34	1.22	2.67	0.91	1.72	2.41	1.33	2.74
PET <sub>erkek</sub>	31.60	52.89	40.78	55.98	31.83	53.84	36.58	56.28	33.04	43.11	53.39	36.96	58.50
PET <sub>kadın</sub>	31.59	52.49	40.62	55.27	31.83	53.25	36.46	55.72	32.99	42.78	52.65	36.86	57.75
PET <sub>Kadın/Erkek Farkı</sub>	0.0094	0.4000	0.1531	0.7083	0.0063	0.5917	0.1125	0.5667	0.0500	0.3313	0.7375	0.1031	0.7500
SVF	0.15	0.41	0.16	0.71	0.17	0.59	0.01	0.82	0.18	0.10	0.85	0.02	0.77

Yukarıdaki çizelgede görüldüğü üzere, tüm alanlarda gölge altında ve gölge dışında yapılan ölçümler arasında farklar bulunmaktadır.

Bunlardan ilki hava sıcaklığı değerlerinde gözlemlenen farklılıklardır. 6 farklı alandan alınan gölge altındaki hava sıcaklığı değerleri  $Ta$  (gölge altı):  $P5a > P6a > P4a > P2a > P4c > P3a > P1a$ ; gölge dışındaki hava sıcaklığı değerleri  $Ta$  (gölge dışı):  $P4b > P5b > P6b > P2b > P3b > P1b$  ve gölge altı ile gölge dışındaki hava sıcaklığı değerleri farkı;  $\Delta Ta$ :  $P4(b-c) > P1(b-a) > P4(b-a) > P3(b-a) > P2(b-a) > P5(b-a) > P6(b-a)$  şeklindedir.

Tüm alanlarda gölge altında alınan en yüksek hava sıcaklığı değeri tramvay durağında (P5a), en düşük hava sıcaklığı değeri Bilmer parkında (P1a) ölçülmüştür. Gölge dışında alınan ölçümlerde; en yüksek hava sıcaklığı asma-germe üst örtünün yanı (P4b), en düşük hava sıcaklığı ise Bilmer parkındaki kamelyanın yanındır (P1b). Gölge altında ve gölge dışında alınan hava sıcaklığı ölçümleri arasında en fazla P4 (b-c) noktasında (asma-germe) 4.64 °C'lik; en az ise P6 noktasında (ahşap kamelya) 0.95 °C'lik fark gözlemlenmiştir.

Alınan ölçümlere göre bağıl nem (RH) değerinde de farklar gözlemlenmiştir. 6 farklı alandan alınan gölge altındaki bağıl nem değerleri  $RH$  (gölge altı):  $P3a > P1a > P2a > P4a > P4c > P5a > P6a$ ; gölge dışındaki bağıl nem değerleri  $RH$  (gölge dışı):  $P1b > P3b > P2b > P4b > P6b > P5b$  ve gölge altı ile

gölge dışındaki bağıl nem değerleri farkı  $\Delta RH: P3(b-a) > P1(b-a) > P4(b-a) > P2(b-a) > P4(b-c) > P5(b-a) > P6(b-a)$  şeklindedir.

Gölge altında tüm alanlardan alınan bağıl nem değerleri en yüksek söğüt altında (P3a), en düşük kamelya altında (P6a) ölçülmüştür. Gölge dışında alınan bağıl nem değerleri ise en yüksek Bilmer Parkında (P1b), en düşük tramvay durağında (P5b) gözlenmiştir. Gölge altında alınan tüm bağıl nem ölçümleri gölge dışında alınan değerlere göre daha yüksek bulunmuştur. Gölge altında ve dışında alınan bağıl nem değerleri farkı incelendiğinde; en fazla fark P3 noktasında (söğüt altı) % 4.35 iken, en az fark P6 noktasında (ahşap kamelya) % 1.22'dir.

6 farklı alandan alınan gölge altındaki rüzgâr hızı değerleri  $Ws_{(gölge\ altı)}: P5a > P3a > P4c > P4a > P6a > P2a > P1a$ ; gölge dışındaki rüzgâr hızı değerleri  $Ws_{(gölge\ dışı)}: P5b > P2b > P6b > P3b > P4b > P1b$  ve gölge altı ile gölge dışındaki rüzgâr hızı değerleri farkı  $\Delta Ws: P2(b-a) > P6(b-a) > P5(b-a) > P3(b-a) > P4(b-a) > P1(b-a) > P4(b-c)$  şeklindedir.

Rüzgâr hızı ve yönü oldukça değişken değerler olmasına rağmen ölçülen ortalama değerler anlamlı sonuçlar vermektedir. Gölge altında alınan değerlere göre, en yüksek rüzgâr hızı tramvay durağında (P5a), en düşük rüzgâr hızı Bilmer parkında (P1a) ölçülmüştür. Gölge altında alınan ölçümlerin tüm alanlarda daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin gölge elemanlarının rüzgârın hızını kesmesi olarak açıklanabilmektedir. Gölge dışında alınan rüzgâr hızı ölçümlerine göre, en yüksek değer tramvay durağında (P5b), en düşük değer ise yine Bilmer parkında (P1b) ölçülmüştür. Gölge altı ve gölge dışında alınan değerler kıyaslandığında en fazla fark P2 noktasında (cami revağı) 0.72 m/sn iken, en az fark P3 noktasında (söğüt altı) 0.22 m/sn olarak bulunmuştur.

6 farklı alandan alınan gölge altındaki ortalama radyan sıcaklık değerleri  $MRT_{(gölge\ altı)}: P5a > P2a > P4a > P6a > P3a > P4c > P1a$ ; gölge dışındaki ortalama radyan sıcaklık değerleri  $MRT_{(gölge\ dışı)}: P6b > P2b > P3b > P4b > P5b > P1b$  ve gölge altı ile gölge dışındaki ortalama radyan sıcaklık değerleri farkı  $\Delta MRT: P6(b-a) > P3(b-a) > P4(b-c) > P1(b-a) > P4(b-a) > P2(b-a) > P5(b-a)$  şeklindedir.

Ortalama radyan sıcaklık değerleri kıyaslandığında, gölge altında en yüksek değer tramvay durağında (P5a), en düşük değer ise Bilmer Parkında (P1a) ölçülmüştür. Gölge dışında, en yüksek değer kamelya yanındaki alanda (P6b), en düşük değer Bilmer Parkında (P1b) ölçülmüştür. Tüm alanlarda gölge dışındaki değerlerin gölge altındaki değerlere göre oldukça fazla ölçüldüğü gözlemlenmiştir. Bulunan bu fark ile kullanıcıların gölge altında çok daha konforlu oldukları anlaşılmaktadır. Elde edilen değerlere göre en fazla fark P6 noktasında (ahşap kamelya) 39.17 °C, en az fark ise P5 noktasında (tramvay durağı) 18.22 °C şeklindedir. Çıkan bu sonuç ile malzeme kompozisyonundan ve geometrik formundan dolayı, tramvay durağının maskeleme etkisinin tam olarak gerçekleşmediği anlaşılmaktadır.

Tüm alanlardan alınan  $PPD_{vaz\ dönemi}$  değerleri incelendiğinde tüm değerlerin birbirine yakın çıktığı ve memnuniyetsizlik oranının oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

6 farklı alandan alınan ölçümler ile bulunan gölge altındaki TOCI değerleri  $TOCI_{(gölge\ altı)}: P5a > P2a > P6a > P4a > P4c > P3a = P1a$ ; gölge dışındaki TOCI değerleri  $TOCI_{(gölge\ dışı)}: P6b > P4b > P2b > P5b > P3b > P1b$  ve gölge altı ile gölge dışındaki TOCI değerleri farkı  $\Delta TOCI: P4(b-c) > P3(b-a) = P1(b-a) > P4(b-a) > P6(b-a) > P2(b-a) > P5(b-a)$  şeklindedir.

TOCI değerleri kıyaslandığında, gölge altında en yüksek değer tramvay durağında (P5a), en düşük değer ise Bilmer Parkı (P1a) ve söğüt altında (P3a) ölçülmüştür. Gölge dışında, en yüksek değer kamelya yanındaki alanda (P6b), en düşük değer Bilmer Parkında (P1b) bulunmuştur. Elde edilen değerlere göre en fazla fark P4 (b-c) noktasında (asma germe) 1.75; en az fark ise P5 noktasında (tramvay durağı) 0.69 şeklindedir.

TOCI değerleri -3 ve +3 arasında değişmektedir. Bu değer 0'a yaklaştıkça konfor oranı artmakta, 0'dan eksi ve artı yöne doğru uzaklaştıkça konfor oranı azalmaktadır. Gölgesiz mekânlarda bu değer en düşük 2.33 ve en yüksek 2.74 değeri arasında değişmektedir. Dolayısıyla bu mekânların oldukça konforsuz mekânlar olduğu görülmektedir. Gölge altındaki mekânlardan en iyi sonucu ise 0.74 değeri ile Bilmer Parkı ve Söğüt altı sağlamaktadır.

6 farklı alandan alınan ölçümler ile bulunan gölge altındaki PET değerleri  $PET_{(gölge\ altı)}: P5a > P2a > P6a > P4a > P4c > P3a > P1a$ ; gölge dışındaki PET değerleri  $PET_{(gölge\ dışı)}: P6b > P4b > P2b > P3b > P5b > P1b$  ve gölge altı ile gölge dışındaki PET değerleri farkı  $\Delta PET: P4(b-c) > P3(b-a) > P6(b-a) > P1(b-a) > P4(b-a) > P2(b-a) > P5(b-a)$  şeklindedir.

PET için bir karşılaştırma yapıldığında, erkek ve kadınlar için bulunan değerler arasındaki farkların oldukça az olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle yalnızca erkekler için bulunan PET değerleri dikkate alınarak bir karşılaştırma yapılmıştır. Gölge altında alınan ölçümlerden en fazla değer tramvay durağı (P5a) iken, en düşük değer Bilmer parkında (P1a) ölçülmüştür. Gölge dışında alınan değerler incelendiğinde ise en fazla değer kamelya yanı (P6b), en düşük değer ise Bilmer Parkı yanındır (P1b). Gölge altında ve gölge dışında alınan ölçümlere göre en fazla fark P4 (b-c) noktasında (çim zemin ve ağaç) 23.24 °C iken, en az fark ise P5 noktasında (tramvay durağı) 10.28 °C'dir. Yine bu sonuç ile tramvay durağının üst örtüsünün, dış ortam termal konforu iyileştirmede çok az katkı getirdiği anlaşılmaktadır.

PET aralıklarının belirlenmesinde özgün değerlerin kullanımı oldukça önemlidir (Canan & Geyikli, 2022). Bu nedenle elde edilen PET değerleri; Canan ve arkadaşları tarafından 2020 yılında belirlenen, Konya için özgün değerler olan termal algı kategorileri ve nötral aralığa (Çizelge 4) göre değerlendirilmiştir.

Çizelge 4. Konya kenti için belirlenmiş termal algı kategorileri ve nötral pet aralığı (Canan ve ark., 2020)

Termal Algı Kategorisi	Çok soğuk	Soğuk	Serin	Biraz serin	Nötral/konforlu	Biraz ılık	Ilık	Sıcak	Çok sıcak
Konya/Türkiye PET (°C)	< (-5.6)	(-5.6)-(-6.2)	(6.2)-(17.9)	-	(17.9)-(29.7)	-	(29.7)-(41.5)	(41.5)-(53.3)	> (53.3)

Termal algı kategorileri ve nötral aralık için yapılan değerlendirmeler aşağıdaki çizelgede görülmektedir (Çizelge 5). Çizelgeye göre, gölge dışındaki ölçümlere kıyasla gölge altındaki tüm alanlarda PET değeri daha düşüktür. Bu nedenle de gölge altı alanlar daha konforlu aralıklardır. Örneğin, P1 noktasında gölge altında "ılık" hissedilirken, gölge dışında "sıcak" hissedilmektedir. Bu sonuçlara göre, tüm gölgeleme elemanları dış ortam termal konfor koşullarını bir miktar iyileştirmiştir. Ancak tam anlamıyla, belirlenen saatlerde nötral PET aralığı içinde olan değerlere rastlanmamıştır. Tüm gölgeleme elemanları kendi içinde kıyaslandığında, en etkili elemanın Amerikan sarmaşıklarla kaplı ahşap gölgeleme elemanı (P1a) olduğu görülmektedir. En az etkili gölgeleme elemanı ise, cam ve çelik malzemeden oluşan tramvay durağı üst örtüsüdür (P5a). Polikarbon malzemenin geçirgenlik ve sera etkisinin bu sonucu verdiğini söyleyebiliriz.

Çizelge 5. Konya kenti için belirlenmiş termal algı kategorilerine göre yorumlama

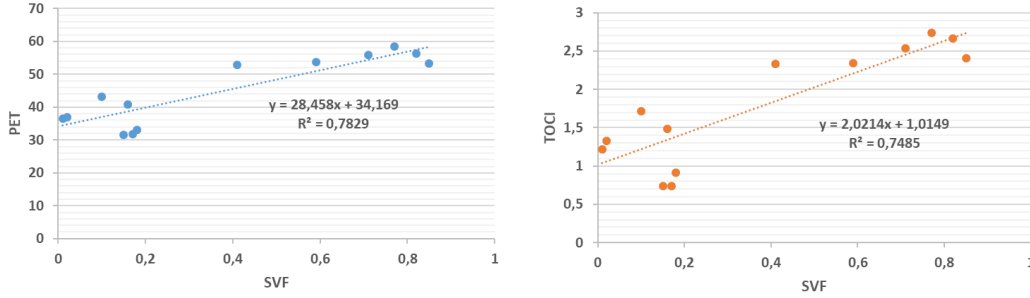
	P1a.	P1b.	P2a.	P2b.	P3a.	P3b.	P4a.	P4b.	P4c.	P5a.	P5b.	P6a.	P6b.
PET (°C)	<b>31.60</b>	52.89	40.78	55.98	31.83	53.84	36.58	56.28	33.04	<b>43.11</b>	53.39	36.96	58.50
Canan ve ark. (2020)'ye göre termal algı kategori aralığı	Ilık	Sıcak	Ilık	Çok sıcak	Ilık	Çok sıcak	Ilık	Çok sıcak	Ilık	Sıcak	Çok sıcak	Ilık	Çok sıcak

PET değerlerinde her alan için ayrı ayrı gölge altı ve gölge dışı değerlerinin farkları incelendiğinde (Çizelge 6) en etkili gölgeleme elemanının P4 noktasındaki çim zemin ve ağaç üst örtüsü olduğu görülmektedir. Ağaç altında alınan ve bu bölgenin hemen dışında gölge olmayan bir noktada alınan ölçümler kıyaslandığında arada 23.24 °C'lik bir fark olduğu görülmüştür. Dolayısıyla yeşil alanların gölgeleme etkisinin dış ortamda en olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. En az etkili olan gölgeleme elemanının ise 10.28 °C ile P5 noktasındaki tramvay durağı üst örtüsü olduğu görülmektedir.

Çizelge 6. PET değerlerinin gölge altı ve gölge dışı arasındaki farkı

	P1 (a-b) Bilmer parkı	P2 (a-b) Cami revağı	P3 (a-b) Söğüt ağacı	P4 (a-b) Asma-germe	P4 (b-c) Çim zemin- Ağaç	P5 (a-b) Tramvay durağı	P6 (a-b) Ahşap kamelya
PET (°C)							
Gölge altı ve gölge dışı arasındaki fark	21.29	15.20	22.01	19.71	<b>23.24</b>	<b>10.28</b>	21.54










**PET- SVF ve TOCI-SVF ilişkisi:** Dış ortam termal konfor çalışmalarında PET ve SVF ilişkisi sıklıkla ele alınmaktadır (Charalampopoulos ve ark., 2013; Deevi & Chundeli, 2020; Nasrollahi ve ark., 2021). Tüm alanlardan balıkgözü lens ile çekilerek elde edilen fotoğraflar Çizelge 7’de yer almaktadır. Mevcut çalışmada PET ve SVF değerleri arasındaki ilişkilendirme lineer regresyonla gerçekleştirilmiştir.  $R^2$  değeri 0.78 bulunmuş olup, iki değişken arasında var olan ilişkinin oldukça iyi bir düzeyde olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 3). Aynı şekilde SVF ve TOCI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 3’te gösterilmiştir. Elde edilen lineer regresyonda  $R^2$  değeri 0.75 bulunmuş olup güçlü bir ilişkiye işaret etmektedir.



Şekil 3. PET-SVF ve TOCI-SVF arasındaki ilişkinin analizi.

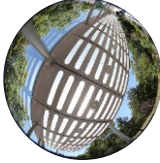



Gölge elemanları farklı yapı malzemelerinden üretilmiş olan P4a noktasının (asma-germe) ve P6a noktasının (ahşap kamelya) SVF değerleri birbirine neredeyse eşit olup PET değerleri ise birbirine çok yakın bulunmuştur (sırası ile 36.58 °C ve 36.96 °C). Aynı şekilde birbirine çok yakın SVF değerlerine sahip P1a (Amerikan sarmaşığı), P3a (söğüt altı) ve P4c (ağaç altı) noktalarında PET değerleri birbirine yakın belirlenmiştir (sırası ile 31.6 °C; 31.83 °C ve 33.04 °C). Benzer şekilde gölgesiz noktalar olan P4b ve P6b’de SVF değerleri birbirine yakın olup PET değerleri birbirinden çok sapmamıştır (sırası ile 56.28 °C ve 58.50 °C).

Çizelge 7. Tüm noktalardan alınan balıkgözü fotoğraflar ve Solweig1d programı ile belirlenen SVF değerleri (Lindberg, 2014)

Konum ismi	Balıkgözü fotoğraflar ve SVF değeri		
	Gölge Altı	Gölge Dışı	Yakın konumda Alternatif mekân
<b>P1</b> Bilmer Parkı	 P1a, SVF: 0.15	 P1b, SVF: 0.41	
<b>P2</b> Cami Revağı	 P2a, SVF: 0.16	 P2b, SVF: 0.71	
<b>P3</b> Söğüt Altı	 P3a, SVF: 0.17	 P3b, SVF: 0.59	
<b>4</b> Sosyal Tesisler yanı Asma-Germe	 P4a, SVF: 0.01	 P4b, SVF: 0.82	 P4c, SVF: 0.18



Çizelge 7. Tüm noktalardan alınan balıkgözü fotoğraflar ve Solweig1d programı ile belirlenen SVF değerleri (Lindberg, 2014) (devam)

Konum ismi	Balıkgözü fotoğraflar ve SVF değeri		
	Gölge Altı	Gölge Dışı	Yakın konumda Alternatif mekân
<b>P5</b> Müh. Fakültesi Tramvay Durağı	 P5a, SVF: 0.10	 P5b, SVF: 0.85	
<b>P6</b> Müh. Fakültesi yanı Kamelya	 P6a, SVF: 0.02	 P6b, SVF: 0.77	

#### 4. Sonuç

Yaz koşullarında, öğle saatlerinde ve yüksek hava sıcaklık değerlerinin olduğu bir zaman diliminde yapılan ölçümler ve hesaplamalar sonucunda, gölge elemanlarının buldukları ortam içinde PET değerlerini düşürdükleri saptanmıştır. Ancak belirlenen zaman diliminde tam anlamıyla hiçbir noktada PET ve TOCI değerleri termal konfor aralığında belirlenememiştir. PET değerleri dikkate alındığında en iyi termal konfor koşulları, nispeten düşük bir stres kategorisi olan biraz sıcak/ılık olarak belirlenmiştir.

Doğal gölgeleme elemanlarının, yapay gölgeleme elemanlarına kıyasla, dış ortam termal konfor koşullarını iyileştirme etkilerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Gölge altında en iyi termal konfor koşulları sırasıyla Amerikan sarmaşık (P1a) ve söğüt ağacıdır (P3a). Ağaç altı çim zemin kaplı alan (P4c) ise 3. sırada yer almıştır. Burada dikkat çeken husus çim zeminin termal konforu iyileştirmede çok büyük bir etki yapmadığıdır. Çünkü Amerikan sarmaşığın alt kısmı parke taş kaplamaya sahip olmasına rağmen PET değeri, çim zemine sahip ağaç altı noktalarına (P3a, P4c) göre biraz daha düşük belirlenmiştir. Gölge elemanları arasında en olumsuz termal konfor koşulları tramvay durağında belirlenmiştir. Tramvay durağının üst örtüsünün şeffaf polikarbon malzemeden oluşması, yüksek PET değerlerinin belirlenmesinde etkili olmuştur.

Gölge altı ve gölge dışı PET değerleri arasındaki fark, gölgeleme elemanının yakın çevresine göre termal konfor koşullarını iyileştirme etkisini göstermiştir. En yüksek PET değeri farkı (23.24 °C), çim zemin kaplı ağaç altı nokta (P4c) ve sert zeminden oluşan ve yüksek SVF değerine sahip P4b noktası arasında belirlenmiştir. Birbirine yakın bu iki konum arasında çevresel oluşum bakımından önemli farklılıkların olması (yeşil doku, sert zemin oranı, SVF değeri), PET değerleri arasındaki farkı arttırmıştır. En az PET değeri farkı ise tramvay durağında bulunmuştur (10.28 °C). Bu sonuç ile tramvay durağının gölgeleme etkisinin çok olmadığı anlaşılmıştır. Gölge altında ve gölge dışında elde edilen PET değerleri arasındaki fark azaldıkça, her iki noktanın termal ortamlarının birbirine yakın olduğu anlamı çıkmaktadır.

Farklı malzemelerden imal edilmiş olsalar bile, yapay gölge elemanlarının, ilgili noktada gökyüzünü maskeleyen oranında dış ortam termal konfor koşullarını belli bir seviyede iyileştirdiklerini söylemek mümkündür. SVF değerleri analiz edildiğinde bu sonuca varılabilmektedir. SVF değerleri arttıkça güneşlenmeye maruz kalma artmaktadır. SVF-PET ilişkisi ve SVF-TOCI ilişkilerinin kabul edilebilir düzeyde saptanmış olması bunu kanıtlamaktadır.

Yaz döneminde öğle saatlerinde hava sıcaklık değerlerinin yüksek seyrettiği saatlerde dış ortamlarda gölge oluşturmak önemlidir. Dış mekânların verimli kullanımlarının sağlanması, kişilerin stres seviyelerini azaltmak ve yaşam kalitelerini arttırmak için önemlidir. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, ağaçlandırmanın çok etkili bir doğal çözüm olduğu görülmektedir.

Bu çalışma aynı zamanda kapsamlı bir şekilde, Konya kenti için üretilmiş özgün termal algı kategorilerinin (PET indisine göre), gölge elemanlarının oluşturduğu yarı açık mekânlarda termal konfor koşullarını değerlendirmede kullanılmasını ortaya koymaktadır. Yine TOCI indisine göre de

termal konfor koşulları belirlenmiştir. Gölgeleme elemanlarının malzeme özelliklerine bağlı olarak dış ortam termal konfor koşullarının ne derece etkilendiği kapsamlı bir araştırma ile ele alınabilir ve sonuçları tartışmaya açılabilir.

## Kaynakça

- Canan, F., Golasi, I., Ciancio, V., Coppi, M., & Salata, F. (2019). Outdoor thermal comfort conditions during summer in a cold semi-arid climate. A transversal field survey in Central Anatolia (Turkey). *Building and Environment*, 148, 212 - 224. doi:10.1016/j.buildenv.2018.11.008
- Canan, F., Golasi, I., Falasca, S., & Salata, F. (2020). Outdoor thermal perception and comfort conditions in the Köppen-Geiger climate category BSk. One-year field survey and measurement campaign in Konya, Turkey. *Science of the Total Environment*, 738, 140295. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140295
- Canan, F., & Geyikli H.B. (2022, Haziran). *Dış ortam termal konfor koşullarının belirlenmesinde özgün veri kullanımının önemi*. 8. Uluslararası Mardin Artuklu Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Mardin-Türkiye.
- Charalampopoulos, I., Tsiros, I., Chronopoulou-Sereli, A., & Matzarakis, A. (2013). Analysis of thermal bioclimate in various urban configurations in Athens, Greece. *Urban Ecosystems*, 16, 217 - 233. doi:10.1007/s11252-012-0252-5
- Crank, P. J., Sailor, D. J., Ban-Weiss, G., & Taleghani, M. (2018). Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies. *Urban Climate*, 26, 188 - 197. doi:10.1016/j.uclim.2018.09.002
- Deevi, B., & Chundeli, F. A. (2020). Quantitative outdoor thermal comfort assessment of street: A case in a warm and humid climate of India. *Urban Climate*, 34, 100718. doi:10.1016/j.uclim.2020.100718
- de Moraes, M. V. B., Marciotto, E. R., Guerrero, V. V. U., & de Freitas, E. D. (2017). Effective albedo estimates for the Metropolitan Area of São Paulo using empirical sky-view factors. *Urban Climate*, 21, 183 - 194. doi:10.1016/j.uclim.2017.06.007
- Fahed, J., Kinab, E., Ginestet, S., & Adolphe, L. (2020). Impact of urban heat island mitigation measures on microclimate and pedestrian comfort in a dense urban district of Lebanon. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102375. doi:10.1016/j.scs.2020.102375
- Farhadi, H., Faizi, M., & Sanaieian, H. (2019). Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101448. doi:10.1016/j.scs.2019.101448
- ISO 7726. (1998). Ergonomics of the Thermal Environment - Instruments for Measuring Physical Quantities.
- Jia, S., & Wang, Y. (2021). Effect of heat mitigation strategies on thermal environment, thermal comfort, and walkability: A case study in Hong Kong. *Building and Environment*, 201, 107988. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107988
- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., & Krüger, E. (2014). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies—The need for standardization. *Urban Climate*, 10, 346 - 366. doi:10.1016/j.uclim.2013.12.002
- Karimi, A., Sanaieian, H., Farhadi, H., & Norouziyan-Maleki, S. (2020). Evaluation of the thermal indices and thermal comfort improvement by different vegetation species and materials in a medium-sized urban park. *Energy Reports*, 6, 1670 - 1684. doi:10.1016/j.egyr.2020.06.015
- Li, G., Ren, Z., & Zhan, C. (2020). Sky View Factor-based correlation of landscape morphology and the thermal environment of street canyons: A case study of Harbin, China. *Building and Environment*, 169, 106587. doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106587
- Lindberg, F. (2014). SOLWEIG1D - User Manual - Version 2015a Göteborg Urban Climate Group, University of Gothenburg.
- Lyu, T., Buccolieri, R., & Gao, Z. (2019). A numerical study on the correlation between sky view factor and summer microclimate of local climate zones. *Atmosphere*, 10(8), 438. doi:10.3390/atmos10080438

- Nasrollahi, N., Namazi, Y., & Taleghani, M. (2021). The effect of urban shading and canyon geometry on outdoor thermal comfort in hot climates: A case study of Ahvaz, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102638. doi:10.1016/j.scs.2020.102638
- Noro, M., & Lazzarin, R. (2015). Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies. *Urban Climate*, 14, 187-196. doi:10.1016/j.uclim.2015.04.004
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (2<sup>nd</sup> ed.). London, UK: Routledge, Taylor & Francis Group. doi:10.4324/9780203407219
- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T., & Matzarakis, A. (2018). Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of the Total Environment* 631 - 632, 390 - 406. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.02.276
- Salvati, A., Kolokotroni, M., Kotopouleas, A., Watkins, R., Giridharan, R., & Nikolopoulou, M. (2022). Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates. *Building and Environment*, 207, 108459. doi:10.1016/j.buildenv.2021.108459



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Tek Yıllık Yabani Nohut Genotiplerinin Agronomik ve Morfolojik Özelliklerinin Biplot Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Fatma BAŞDEMİR<sup>\*1</sup>, Sibel İPEKEŞEN<sup>2</sup>, Murat TUNÇ<sup>3</sup>, Leyla TURAN<sup>2</sup>, Abdullah KAHRAMAN<sup>3</sup>, B. Tuba BİÇER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Ceylanpınar Tarım Meslek Yüksekokulu, 63000, Şanlıurfa, Türkiye

<sup>2</sup>Dicle Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, 21000, Diyarbakır, Türkiye

<sup>3</sup>Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, 63000, Şanlıurfa, Türkiye

Fatma BAŞDEMİR, ORCID No: 0000-0002-1086-5628, Sibel İPEKEŞEN, ORCID No: 0000-0002-7141-5911, Murat TUNÇ, ORCID No: 0000-0001-6226-128X, Leyla TURAN, ORCID No: 0000-0002-4329-1560, Abdullah KAHRAMAN, ORCID No: 0000-0002-8829-3797, Behiye Tuba BİÇER, ORCID No: 0000-0001-8357-8470

\*Sorumlu yazar e-posta: fatmabasdemir@harran.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 27.09.2022

Kabul: 04.01.2023

Online Ağustos 2023

DOI: 10.53433/yyufbed.1180768

#### Anahtar Kelimeler

Biplot,  
*Cicer arietinum*,  
*Cicer echinospermum*,  
*Cicer reticulatum*,  
Yabani nohut

**Öz:** Bu çalışmada yıllık *Cicer* yabani genotipleri ile kültür nohutlarının bitki boyu, kök uzunluğu, gövde kuru ağırlığı, kök kuru ağırlığı, nodül sayısı ve nodül yaş ağırlığı özellikleri açısından ilişkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Denemede 6 adet *C. echinospermum*, 20 adet *C. reticulatum* ve 2 adet kültür nohutu kullanılmıştır. Deneme 2018 ve 2019 yıllarında Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesinde yağmur korunaklı sulama kontrollü yarı açık alanda saksı denemesi şeklinde yürütülmüştür. İncelenen özellikler bakımından yabani genotip ve kültür nohutlarında geniş varyasyon saptanmıştır. İncelenen özellikler ve genotipler arasındaki ilişkiler biplot analiz ile ilişkilendirilmiştir. 2018 yılı Scatter biplot yöntemi ile yapılan analizde PC1 (1. ana bileşen) %44.53, PC2 (2. ana bileşen) %28.49, toplamda varyasyonun %73.02'sini oluşturmuştur. 2019 yılı Scatter biplot yöntemi ile yapılan analizde PC1 (1. ana bileşen) %57.92, PC2 (2. ana bileşen) %32.40, toplamda varyasyonun %90.32'sini oluşturmuştur. Yabani genotip ve kültür nohutlarının incelediğimiz morfolojik özellikler ile ilişkilerinde yabani genotiplerin daha yakın ilişki gösterdiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar kültürü yapılan nohut çeşitlerindeki genetik daralmayı genişletmek ve zenginleştirmek için ıslah programlarında yabani genotiplerin değerlendirilebileceğini göstermiştir.

### Evaluation of Agronomic and Morphological Characteristics of Annual Wild Chickpea Genotypes by Biplot Analysis Method

#### Article Info

Received: 27.09.2022

Accepted: 04.01.2023

Online August 2023

DOI: 10.53433/yyufbed.1180768

#### Keywords

Biplot,  
*Cicer arietinum*,  
*Cicer echinospermum*,

**Abstract:** In this study, the relationships between annual wild *Cicer* genotypes and cultivated chickpeas for plant height, root length, stem dry weight, root dry weight, number of nodules per plant and nodule wet weight per plant were tried to be determined. In the experiment, 6 *C. echinospermum*, 20 *C. reticulatum* and 2 cultivated chickpeas were used. The experiment was carried out at Dicle University, Faculty of Agriculture in 2018 and 2019 years in pots in a semi-open area with rain shelter and irrigation control. A wide variation was detected in wild and cultivated chickpeas for all of the traits. Relationships between investigated traits and genotypes were correlated with biplot analysis. In the analysis performed with the Scatter biplot method in 2018, PC1 (1st principal component) 44.53%, and PC2 (2nd principal component) 28.49% explained

*Cicer reticulatum*,  
*Wild Cicer*

73.02% of the variation in total. In 2019, PC1 with 57.92% and PC2 with 32.40%, explained 90.32% of the variation in total. It was determined that wild genotypes and cultivated chickpeas showed a closer relationship with the morphological features we examined. Wild genotypes can be evaluated in breeding programs to expand and enrich the genetic narrowing in cultivated chickpeas.

## 1. Giriş

Son yıllarda, iklim değişikliğine karşı mücadelede, gıda güvenliğini ve insan sağlığını teşvik etmede baklagillerin daha geniş kullanımlarının önemi açıkça kabul edilmiştir (Bellucci ve ark., 2021). Besin açısından zengin ürün çeşitlerinin geliştirilmesi, protein ve mineral eksikliklerinden kaynaklanan yetersiz beslenmeyle mücadele için en ekonomik stratejidir (Sharma ve ark., 2021). Önemli miktarda protein, lif ve mikro besin kaynağı içeren baklagiller, insan beslenmesinde tahıllardan sonra en çok tercih edilen bitki grubu olup yakın gelecek için beslenme güvenliğinin anahtarı olma özelliği taşımaktadır.

Nohutun (*Cicer arietinum* L.), dünya genelinde giderek artmakta olan insan nüfusunun beslenme ihtiyacını karşılaması ve çoklu kullanım alanına sahip olması nedeniyle baklagiller içerisindeki popüleritesi artmaktadır. Nohut dünyada 9.5 milyon hektar ekim alanı ve 9.9 milyon ton üretim miktarı ile fasulye ve bezelyeden sonra baklagil bitkileri arasında en fazla ilgi gören baklagil bitkisidir (FAO, 2020).

Kültürü yapılan nohutun dar genetik tabanı, nohut ıslah programlarında yüksek genetik kazanımların gerçekleştirilmesine yönelik ilerlemeyi engellemiştir (Singh ve ark., 2021). *Cicer arietinum*'un genetik dar tabana sahip olması verim ve kalitesini artırmak amacıyla yapılan araştırmaların düşük düzeyde tür içi genetik çeşitliliği ile sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Nohutun, *Cicer* türleri arasında yer alan *Cicer reticulatum* türünün kültüre alınması ile elde edildiği ve orjin merkezinin Türkiye olduğu düşünülmektedir (Von Wettberg ve ark., 2018). Bununla birlikte, yabani akrabalarının bulunduğu ikincil gen havuzuna erişilmesi genetik çeşitliliğini genişletme olanağı sunmaktadır (Singh ve ark., 2005). Bu genetik çeşitlilik, kültüre alınan türlerin *Cicer* cinsinin yabani akrabalarla melezlenmesi yoluyla elde edilebilmektedir. Ayrıca, farklı abiyotik ve biyotik stresler, dünya genelinde nohut verimliliğini engelleyen başlıca darboğazlardır. Bu yabani türlerin bazıları, biyotik ve abiyotik streslere karşı dayanıklı olduğundan (Croser ve ark., 2003; Karaköy ve ark., 2018) nohut ıslah programlarında morfolojik özellikleri ve direnci ortaya çıkarmak için önem arz etmektedir. Islah programının ilerlemesi ise çevre etkisi, çevre büyüklüğü, bitki ile çevre arasındaki ilişki ve bitki genotipik varyasyonlara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Nohutun genetik çeşitliliği dünya çapında birçok araştırmacı (Upadhyaya & Ortiz, 2001; Ton & Anlarsal, 2018; Von Wettberg ve ark., 2018, Bohra ve ark., 2022) tarafından incelenmektedir. Yabani nohut genotiplerinin bulunduğu orjin merkezlerine göre önemli agronomik ve morfolojik özellikleri hakkında bilgi edinme ve bu kaynakların ıslah programlarında kullanılması bu konuda çalışan araştırmacıların sürekli ilgisini çekmektedir. Bu araştırma ile Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu bölgesinden toplanan yabani nohut genotiplerinin toprak üstü ve toprak altı aksamaları ve bu incelenen özellikler ile *Cicer* türleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu araştırma 2018 ve 2019 yıllarında Şubat-Mayıs ayları arasında Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi'nde yürütülmüştür.

Deneme toprağı; hafif alkali, orta derecede kireçli, organik maddece ve azotça fakir, orta miktarda potasyumlu, kalsiyum ve demir bakımından zengindir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Denemede kullanılan toprağın özellikleri

pH	Kireç	Organik Madde	N	P	Ca	Fe
7.65	11.71%	0.70%	6.23 mg/kg	13 mg/kg	8.85 ppm	7.71 ppm



Araştırmanın ilk yılında 26 adet yabani nohut genotipi (*C. reticulatum* ve *C. echinospermum*), ikinci yıl birinci yıl homojen çıkış sağlayan türlerden seçim yapılarak 8 yabani genotip ve her iki yılda 2 kültür (Gökçe ve Çağatay) nohutu kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan tek yıllık yabani nohut genotiplerine ait bilgiler Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Yabani nohut genotiplerinin toplandığı bölgelere ait bilgiler

G.No 2018	G.No 2019	Genotip	Tür	Biyotip	Enlem	Boylam	Yükseklik
3	3	Cermik_075	<i>Cicer echinospermum</i>	yabani	38.05	39.42	770.30
4	4	Deste_080	<i>Cicer echinospermum</i>	yabani	37.78	39.17	738.86
5	5	Gunaz_062	<i>Cicer echinospermum</i>	yabani	38.01	39.37	841.60
6		Karab_092	<i>Cicer echinospermum</i>	yabani	37.82	39.76	1264.41
7		Ortan_066	<i>Cicer echinospermum</i>	yabani	37.47	39.56	861.33
8		S2Drd_065	<i>Cicer echinospermum</i>	yabani	37.82	39.64	1125.82
9		Bari1_092	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.49	41.37	976.17
10		Bari2_072N2	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.46	41.38	961.33
11		Bari3_072C	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.47	41.39	960.62
12		Bari3_100	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.47	41.39	950.74
13		Bari3_106D	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.47	41.39	952.13
14	6	Besev_075	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.52	40.85	902.23
15		Besev_079	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.52	40.86	902.06
16		CudiA_152	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.43	42.49	1285.94
17	7	CudiB_022C	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.43	42.50	1366.59
18		Derei_070	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.54	41.02	992.83
19	8	Derei_072	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.54	41.02	992.42
20		Egil_065	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	38.27	40.06	987.44
21	9	Egil_073	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	38.27	40.06	988.06
22		Kalka_064	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	38.16	40.09	841.85
23	10	Kayat_077	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.52	40.94	1086.14
24		Kesen_075	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	38.20	39.61	890.61
25		Oyali_084	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.73	37.80	940.23
26		Sarik_067	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.55	41.02	1002.58
27		Savur_063	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.55	40.91	914.56
28		Sirnak_060	<i>Cicer reticulatum</i>	yabani	37.54	42.45	1658.92

Deneme yağmur korunaklı sulama kontrollü yarı açık alanda saksı denemesi şeklinde yürütülmüştür. Denemede 30 cm çapında 6 litrelik saksılar kullanılmıştır. Saksı toprağı 2 mm çapında elekten geçirilmiş, saksılar doldurulduktan sonra sulanarak tarla kapasitesine getirilmiştir. Denemede homojen bitki çıkışı sağlamak amacıyla yabani genotiplere ait tohumlara ekim öncesi tohum kabuğu kırma işlemi uygulanmış, her saksıda beş tohum olacak şekilde her iki yılda 22 Şubat tarihinde ekim yapılmıştır. Deneme tesadüf parselleri deneme deseninde 2018 yılında 6 tekrarlamalı 2019 yılında 3 tekrarlamalı olarak düzenlenmiştir. Bitki çıkışından 14 gün sonra her saksıda 3 bitki kalacak şekilde seyreltme işlemi gerçekleştirilmiştir. Saksılardaki bitkilerin hasadı 2018 yılında çiçeklenme başlangıcı döneminde, ikinci yılda tam çiçeklenme döneminde yapılmıştır. Bitkiler hasat edildikten sonra köklerden toprağı temizlemek amacıyla musluk suyu ile yıkanmış kurutma kâğıdı ile yüzeydeki nem alınmıştır. Denemede bitki boyu, kök uzunluğu, gövde ve kök kuru ağırlığı, nodül sayısı ve nodül yaş ağırlığı ölçümleri alınmıştır. Kuru ağırlık ölçümleri için bitkiler sabit ağırlığa ulaşmaya kadar 70 °C’de 48 saat etüvde kurutulmuştur.

Araştırmadan elde edilen verilere basit istatistik analizi uygulanmış ortalama, min., mak., standart sapma değerleri MSTAT-C (Michigan State University, East Lansing, MI) istatistik paket programında yapılmıştır. Biplot analizi GenStat 12 analiz programında yapılmıştır.

### 3. Bulgular

Yabani nohut genotipleri ve kültür nohutlarının toprak üstü ve toprak altı aksamalarının incelenen özelliklerine ait ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum değerleri Çizelge 3 ve 4'te verilmiştir.

Nohut yabani genotip ve kültür nohutlarında incelenen özellikler her iki yılda da geniş varyasyon göstermiştir (Çizelge 3 ve 4).

Bitki boyu ortalama değerleri 2018 yılında 36.0-74.7 cm, 2019 yılında 22.2-44.3 cm arasında değişmiştir. En düşük bitki boyu 2018 yılında Savur-063 ve Besev-075, 2019 yılında CudiB-022C ve Besev-075 genotiplerinde saptanmıştır.

Kök uzunluğu ortalama değerleri 2018 yılında 21.0-44.0 cm, 2019 yılında 18.7-40.2 cm arasında değişmiştir. En düşük kök uzunluğu değerleri 2018 yılında Ortan-066, Bari3-100, Bari3-106D, Kesen-075, Oyali-084, CudiB-022C, en yüksek ise S2DRD-065 genotipinde belirlenmiştir. Bitki boyu ve kök uzunluğu kültür nohutlarında 2018 yılında 2019 yılına göre daha yüksek değerlere sahip olurken, yabani genotiplerde kültür nohutlarının aksine 2019 yılında daha yüksek bitki boyu ve kök uzunluğu elde edilmiştir.

Gövde kuru ağırlığı ortalama değerleri 2018 yılında 1.3-3.2 g olup en yüksek değer kültür nohutunda, en düşük değer ise Bari3-106D, Besev-075, Sarik-067, Kalka-064 ve Kayat-077 genotiplerinde saptanmıştır. 2019 yılında 1.8-5.5 g olup kültür nohutları yüksek değer vermiştir. Besev-075 ve Gunas-062 en düşük gövde kuru ağırlığına sahip olmuştur. Kök kuru ağırlığı ortalama değerleri 2018 yılında 0.3-0.9 g, 2019 yılında 0.4-1.9 g arasında değişmiştir. En yüksek değer 2018 yılında Eğil-065 genotipinde, 2019 yılında ise Eğil-073 genotipinde saptanmıştır. Yıllar arasındaki farklılık 2018 yılının ölçümlerinin çiçeklenme başlangıcı, 2019 yılı ölçümlerinin tam çiçeklenme döneminde alınmasından kaynaklanmış olabilir. Bitki gelişiminde geçen her bir gün bitki kütle ağırlığında önemli farklılık oluşturmaktadır.

Çizelge 3. 2018 yılı kültür nohutları ile yabani nohut genotiplerinde bitki boyu, kök uzunluğu, gövde kuru ağırlığı, kök kuru ağırlığı, nodül sayısı, nodül yaş ağırlığına ait değerler

Genotip	Bitki boyu (cm)		Kök uzunluğu (cm)		Gövde kuru ağırlığı (g)		Kök kuru ağırlığı (g)		Nodül sayısı (adet)		Nodül yaş Ağırlığı (g)	
	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max
Standart 1	74.7±15.2	61-91	27.3±5.5	22-33	3.2±0.4	2.9-3.6	0.4±0.2	0.3-0.6	25±12	14-39	0.14±0.07	0.10-0.22
Standart 2	66.2±10.3	60-78	36.2±5.8	30-40	2.8±1.1	1.8-4.0	0.4±0.3	0.2-0.7	53±24	28-77	0.44±0.32	0.25-0.81
<i>Cicer echinospermum</i>												
Cermik-075	48.0±6.0	42-54	30.7±7.4	25-39	2.4±0.3	2.2-2.7	0.7±0.2	0.5-0.8	104±14	92-120	0.86±0.12	0.76-0.99
Deste-080	48.0±2.0	46-50	29.0±4.6	25-34	1.9±0.3	1.6-2.1	0.7±0.1	0.5-0.8	112±34	75-142	1.12±0.46	0.65-1.58
Gunas-062	44.3±5.7	38-49	30.0±6.6	24-37	1.8±0.6	1.1-2.2	0.5±0.1	0.4-0.5	63±17	47-82	0.67±0.17	0.50-0.85
Karab-092	47.7±8.7	38-55	39.7±8.5	30-46	1.9±0.9	0.9-2.8	0.4±0.1	0.4-0.5	77±4	73-82	0.74±0.02	0.72-0.76
Ortan-066	50.0±4.6	46-55	23.7±3.5	20-27	2.0±0.1	2.0-2.1	0.5±0.05	0.5-0.6	79±8	69-84	0.70±0.11	0.58-0.81
S2DRD-065	48.0±2.6	45-50	44.0±11.5	33-56	1.9±0.3	1.4-2.1	0.4±0.2	0.3-0.6	49±16	32-65	0.51±0.18	0.31-0.65
<i>Cicer reticulatum</i>												
Bari1-092	45.3±4.7	40-49	25.3±4.2	22-30	0.9±0.1	0.9-1.1	0.3±0.1	0.2-0.3	33±2	31-35	0.20±0.02	0.18-0.23
Bari2-072N2	42.0±4.0	38-46	28.3±7.1	22-36	2.2±0.1	2.1-2.3	0.4±0.1	0.3-0.4	89±7	82-96	0.37±0.12	0.23-0.44
Bari3-072C	45.7±3.5	42-49	24.7±1.5	23-26	1.6±0.4	1.2-1.9	0.5±0.1	0.4-0.5	69±4	65-74	0.40±0.07	0.32-0.47
Bari3-100	41.5±1.8	39-43	27.0±1.7	26-29	1.9±0.6	1.5-2.6	0.5±0.2	0.4-0.7	36±15	20-51	0.31±0.13	0.21-0.46
Bari3-106D	43.0±2.0	41-45	22.7±2.5	20-25	1.3±0.1	1.2-1.4	0.4±0.03	0.4-0.4	38±10	27-48	0.41±0.01	0.30-0.49

Çizelge 3. 2018 yılı kültür nohutları ile yabani nohut genotiplerinde bitki boyu, kök uzunluğu, gövde kuru ağırlığı, kök kuru ağırlığı, nodül sayısı, nodül yaş ağırlığına ait değerler (devam)

Genotip	Bitki boyu (cm)		Kök uzunluğu (cm)		Gövde kuru ağırlığı (g)		Kök kuru ağırlığı (g)		Nodül sayısı (adet)		Nodül yaş Ağırlığı (g)	
	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max
Besev-075	37.0±3.5	33-39	29.0±5.0	24-34	1.3±0.2	1.2-1.5	0.3±0.1	0.3-0.4	83±42	45-129	0.26±0.10	0.15-0.33
Besev-079	43.3±2.9	40-45	30.0±8.2	23-39	1.6±0.6	0.9-2.1	0.4±0.2	0.2-0.5	36±14	26-53	0.17±0.12	0.09-0.30
CudiA-152	47.0±5.2	41-50	33.3±5.9	29-40	2.2±0.2	1.9-2.4	0.7±0.1	0.5-0.8	152±88	64-240	0.82±0.33	0.46-1.10
CudiB-022C	46.7±4.5	42-51	21.7±3.0	19-25	2.4±0.3	2.1-2.6	0.7±0.1	0.6-0.7	111±6	105-117	0.88±0.09	0.78-0.96
Derei-070	40.7±10.9	28-47	25.0±2.6	22-27	1.6±0.7	0.7-2.1	0.3±0.1	0.3-0.4	57±30	29-90	0.23±0.06	0.17-0.30
Derei-072	40.3±1.5	39-42	25.0±2.0	23-27	1.7±0.03	1.6-1.7	0.4±0.03	0.4-0.5	73±25	47-97	0.51±0.15	0.42-0.68
Eğil-065	42.3±3.5	39-46	31.0±1.7	29-32	2.4±0.5	2.1-3.0	0.9±0.2	0.7-1.2	73±15	56-85	0.85±0.14	0.69-0.96
Eğil-073	44.7±5.7	40-51	30.3±3.8	26-33	1.8±0.5	1.4-2.3	0.3±0.1	0.3-0.4	56±19	40-78	0.31±0.16	0.21-0.50
Kalka-064	44.0±1.7	43-46	28.0±1.7	27-30	1.5±0.2	1.3-1.7	0.3±0.1	0.2-0.4	55±18	38-75	0.34±0.10	0.26-0.46
Kayat-077	45.3±3.2	43-49	27.7±3.5	24-31	1.5±0.3	1.3-1.9	0.3±0.1	0.3-0.4	50±19	28-64	0.23±0.06	0.16-0.27
Kesen-075	45.0±6.9	37-49	21.0±2.0	19-23	1.8±0.2	1.6-2.0	0.5±0.1	0.4-0.6	99±14	90-116	0.87±0.08	0.80-0.96
Oyali-084	46.3±4.6	41-49	22.3±3.8	18-25	2.0±0.3	1.7-2.3	0.5±0.1	0.4-0.6	82±8	76-92	0.61±0.09	0.50-0.66
Sarik-067	41.0±3.0	38-44	31.3±5.9	27-38	1.4±0.1	1.2-1.5	0.4±0.03	0.4-0.4	60±9	50-69	0.45±0.14	0.29-0.55
Savur-063	36.0±2.0	34-38	27.3±4.6	22-30	1.9±0.2	1.6-2.1	0.3±0.2	0.2-0.6	18±2	16-20	0.10±0.01	0.09-0.12
Sirna-060	41.0±3.6	38-45	26.7±3.0	24-30	1.6±0.3	1.3-1.8	0.5±0.1	0.3-0.6	104±30	70-129	0.88±0.16	0.78-1.07

Çizelge 4. 2019 yılı kültür nohutları ile yabani nohut genotiplerinde bitki boyu, kök uzunluğu, gövde kuru ağırlığı, kök kuru ağırlığı, nodül sayısı, nodül yaş ağırlığına ait değerler

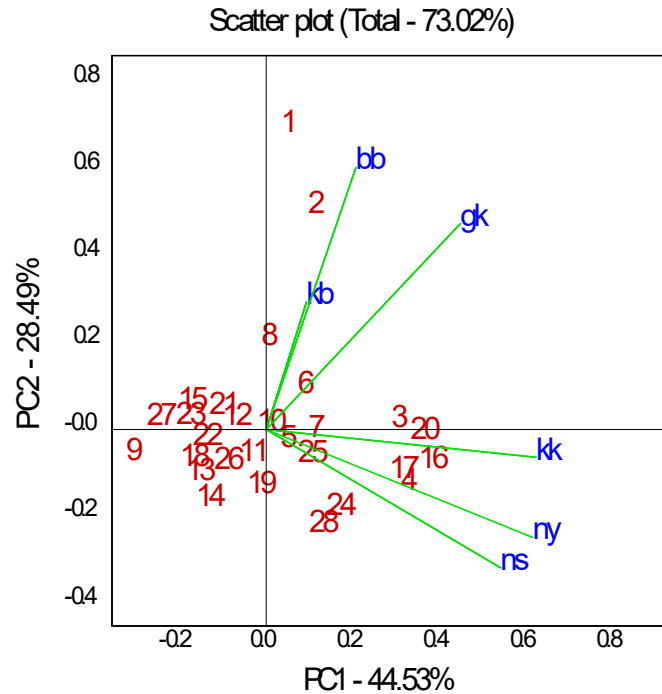
Genotip	Bitki boyu (cm)		Kök uzunluğu (cm)		Gövde kuru ağırlığı (g)		Kök kuru ağırlığı (g)		Nodül sayısı (adet)		Nodül yaş Ağırlığı (g)	
	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max	Ort±stdv	Min-max
Standart 1	32.0±2.6	29-34	18.7±3.0	16-22	3.2±0.8	2.4-3.9	0.4±0.1	0.2-0.5	55±22	42-82	0.82±0.24	0.65-1.10
Standart 2	44.3±2.5	42-47	22.0±1.0	21-23	5.5±1.7	3.8-7.3	0.7±0.2	0.5-0.9	123±57	70-185	2.36±1.29	0.10-3.56
<i>Cicer echinospermum</i>												
Cermik-075	29.2±4.7	17-37	39.8±14.0	26-74	2.3±0.9	1.0-3.4	1.6±0.6	0.6-3.1	129±58	48-253	1.20±0.56	0.56-2.68
Deste-080	27.3±6.0	9-37	38.2±12.8	24-75	2.5±1.1	0.9-5.4	1.8±0.6	0.4-2.9	108±49	25-268	1.15±0.57	0.41-2.76
Gunas-062	30.3±5.4	22-38	39.0±6.3	32-50	2.0±0.8	1.1-3.9	1.6±0.6	0.9-2.6	96±48	7-169	1.16±0.60	0.12-2.21
<i>Cicer reticulatum</i>												
Besev-075	25.1±3.8	20-32	40.2±16.3	31-93	1.8±0.2	1.3-2.1	1.3±0.3	0.8-1.9	75±49	0-160	0.73±0.46	0.00-1.37
CudiB-022C	22.2±3.2	15-29	36.6±8.1	25-55	2.8±1.1	0.5-4.6	1.7±0.9	0.3-3.3	178±83	62-347	1.46±0.70	0.47-2.82
Derei-072	27.1±4.1	20-36	33.7±7.1	22-51	2.4±0.9	1.2-4.8	1.8±0.7	0.7-3.4	151±45	38-247	1.48±0.44	0.59-2.65
Eğil-073	31.0±3.9	23-39	38.8±8.8	24-60	2.9±0.91	1.7-5.1	1.9±0.7	0.4-3.4	130±61	0-292	1.69±0.85	0.00-4.00
Kayat-077	29.2±5.3	21-50	38.6±9.6	27-68	2.4±0.6	1.2-3.7	1.4±0.5	0.5-2.3	85±36	22-149	1.19±0.53	0.26-2.02

Nodül sayısı ortalama değerleri 2018 yılında 18-152 adet, 2019 yılında 55-178 adet arasında değişmiştir. 2018 yılında Savur-063 genotipi en düşük değeri gösterirken CudiA-152 genotipi en yüksek nodül sayısına sahip olmuştur. *Cicer echinospermum* genotiplerinin yüksek oranda nodül ürettikleri saptanmıştır. 2019 yılında ise en düşük nodül sayısı kültür nohutundan, en yüksek nodül sayısı CudiB-022C genotipinden elde edilmiştir. *Cicer reticulatum* genotiplerinin yüksek oranda nodül ürettikleri saptanmıştır. Normal olarak tarla denemelerinde birkaç nodül bir araya gelerek büyük kütle şeklinde bakteri grupları oluşturmasına rağmen saksı denemesi olarak sürdürülen bu çalışmada, sekonder köklerin üzerinde sayılamayacak kadar küçük ancak çok sayıda nodül tespit edilmiştir.

Nodül yaş ağırlığı ortalama değerleri 2018 yılında 0.10-1.12 g, 2019 yılında 0.82-2.36 g arasında değişmiştir. 2018 yılında en düşük nodül yaş ağırlığı Savur-063, en yüksek nodül yaş ağırlığı Çermik-075, Deste-080, CudiB-022C, Eğil-065, Kesen-075 ve Sirna-060 genotiplerinden elde edilmiştir. 2019 yılında ise hem en düşük hem de en yüksek nodül yaş ağırlığı değerleri kültür nohutlarında ölçülmüştür.

Kültür nohutlarına oranla maksimum nodül sayısı hem 2018 hem de 2019 yıllarında yabani genotiplerde bulunmuştur. Nodül yaş ağırlığında ise yabani genotiplerin Kültür nohutlarından daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

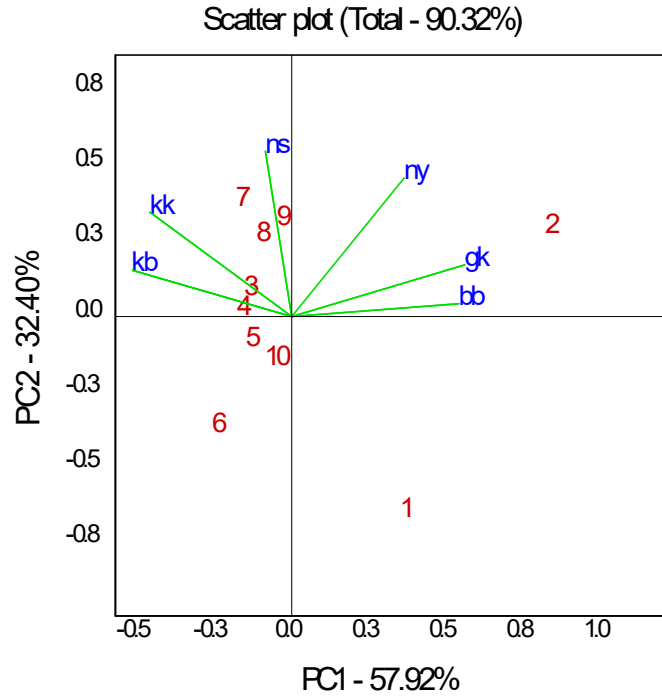
Araştırma incelenen özellikler arasındaki ilişkiler genotip-özellik biplot analizi ile yapılmıştır. Genotip özellik biplot grafiği 2018 ve 2019 yılları için sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. 2018 yılı Scatter biplot yöntemi ile yapılan analizde PC1 (1. ana bileşen) %44.53, PC2 (2. ana bileşen) % 28.49, toplamda varyasyonun %73.02'sini oluşturmuştur. 2019 yılı Scatter biplot yöntemi ile yapılan analizde PC1 (1. ana bileşen) %57.92, PC2 (2. ana bileşen) % 32.40, toplamda varyasyonun % 90.32'sini oluşturmuştur. İncelenen özelliklerle ilişkinin her iki yılda da yabani genotiplerde kültür nohutlarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özelliklere doğru çizilen vektörlerin arasındaki açı ile özelliklerin ilişkisi hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Dar açı (0°-90°) birbirleriyle pozitif ilişkili olduğu, geniş açı (90°-180°) ise birbirleriyle ilişkinin negatif olduğunu göstermektedir. Bu açı 90° olursa herhangi bir ilişki olmadığı şeklinde yorumlanmaktadır (Karaman, 2020). Her iki yılda da özellikler 2 gruba ayrılmıştır.



Şekil 1. 2018 yılı Biplot yöntemi ile genotip özellik ilişkisi.

bb: bitki boyu, kb: kök boyu, gk: gövde kuru ağırlığı, kk: kök kuru ağırlığı, ns: nodül sayısı, ny: nodül yaş ağırlığı

2018 yılında bitki boyu, kök boyu ve gövde kuru ağırlığı özellikleri aynı grupta yer alırken, kök kuru ağırlığı, nodül yaş ağırlığı ve nodül sayısı özellikleri bir grupta yer almıştır. 2019 yılında ise kök boyu, kök kuru ağırlığı ve nodül sayısı bir grupta yer alırken, bitki boyu, gövde kuru ağırlığı ve nodül yaş ağırlığı ayrı bir grupta yer almıştır. Her iki yılda kök boyu özelliği ile *C. echinospermum* genotiplerinin yakın ilişkili olduğu, 2018 yılında 6 ve 8 nolu genotiplerin, 2019 yılında ise 3 ve 4 nolu genotiplerin ön plana çıktığı belirlenmiştir. 2018 yılında kök kuru ağırlığı özelliği ile 3, 16, 17 ve 20 nolu genotiplerin daha yakın ilişki gösterdiği tespit edilmiştir. Nodül sayısı özelliği ile kültür nohutlarının her iki yılda da ilişkili olmadığı, 2019 yılında yabancı genotiplerden 7, 8 ve 9 nolu genotiplerin yakın ilişkili olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2. 2019 yılı Biplot yöntemi ile genotip özellik ilişkisi.

bb: bitki boyu, kb: kök boyu, gk: gövde kuru ağırlığı, kk: kök kuru ağırlığı, ns: nodül sayısı, ny: nodül yaş ağırlığı

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Yabani nohut genotipleri ve kültür nohutlarının morfolojik özellikleri bakımından incelendiği bu araştırmada; kültür nohutlarının bitki boyunun yabancı genotiplere oranla daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bitki boyu özelliği ile bulgularımız önceki araştırmaların bildirdiklerine benzer bulunmuştur. Nitekim [Güngör & Dumlupınar \(2018\)](#), [Demirci & Bildirici \(2020\)](#) ve [Topçu & Akçura \(2022\)](#), kültür nohutlarının bitki boyunun daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Yabancı genotiplerin gelişim formu kültür çeşitlerinden farklıdır ve kültür çeşitlerinin aksine dik gelişme göstermezler. Bu nedenle yabancı genotiplerin kapladığı alanın ölçülmesi daha anlamlı olacaktır. Ayrıca yabancı genotiplerin bitki iriliğinin kültür çeşitlerinden daha küçük olduğu bildirilmiştir ([Redden & Berger, 2007](#)). Yine [Singh & Ocampo \(1997\)](#), yabancı genotiplerin önemli ölçüde düşük tane verimi, hasat indeksi, bitki boyu ve tane ağırlığına sahip olduğunu belirtirken [Kaya & Şanlı \(2008\)](#), daha iri tohumla sahip olan çeşidin daha uzun bitki boyuna sahip olduğunu ve daha uzun boya sahip çeşitlerin daha fazla toprak üstü kuru ağırlık gösterdiğini bildirmişlerdir.

Her iki yılda da yabancı genotiplerin daha yüksek kök uzunluğu ve kök kuru ağırlığına sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle kuraklık stresi için aranan bir özellik olan kök uzunluğu ve kök kuru ağırlığının yabancı genotiplerde daha yüksek ve yakın ilişkili olması önem arz etmektedir. Su ve besin elementlerinin alımını sağlayan kök yapısının bilinmesi ile kuraklık stresi çalışmalarında ve ıslah programlarında uygun genotip seçimi sağlanacaktır. Kök uzunluğu ile genotip ilişkisinde 3 ve 4 nolu



*C. echinospermum* genotiplerinin (sırasıyla Çermik-075 ve Deste-080) öne çıktığı, özellikle çiçeklenme dönemindeki kök kuru ağırlığı ile genotip ilişkisinde kültür nohutlarının ilişkili olmadığı görülmektedir (Şekil 2). Kashiwagi ve ark. (2005), *C. reticulatum* türleri hariç yabani genotiplerin kök gelişiminin daha düşük olduğunu, ancak kökün gelişiminde toprak yapısı ve çevre koşullarının daha etkin olduğunu bildirmişlerdir. Danehlouepour ve ark. (2006), yabani genotiplerin çiçeklenme dönemi öncesinde kök oranının daha yüksek olduğunu, Kaya & Şanlı (2008), daha büyük toprak üstü aksama sahip çeşidin daha kısa kök uzunluğuna sahip olduğunu ancak daha kısa kök uzunluğuna sahip olan çeşidin kök kuru ağırlığının daha az olmadığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada kök uzunluğu yönünden benzer şekilde bir sonuç alınmış ancak kök kuru ağırlığı farklı olarak daha uzun kök yapısına sahip genotiplerden elde edilmiştir.

Baklagillerin elementel azotu tespit etmesindeki yol köklerdeki nodül oluşumu ve aktivitesi ile ilgilidir. Bu çalışmada yabani genotiplerin standart çeşitlerden sayıca çok daha fazla nodül oluşturduğu ve nodül yaş ağırlığı değerlerinin de kültür çeşitlerinden daha geniş varyasyona sahip olduğu belirlenmiştir. 2018 yılındaki nodül sayısı ve nodül yaş ağırlığı özellikleri ve genotip ilişkisi yabani genotiplerin bu özellikler bakımından daha etkili olduğunu göstermiştir (Şekil 1). Çalışmamıza benzer şekilde Jaiswal & Singh (1990), *C. reticulatum* türünün daha yüksek sayıda nodül oluşturduğunu, Kim ve ark. (2014), *C. reticulatum* türlerinin nodül zenginliğinin daha iyi olduğunu ve kültür nohutlarının sınırlı genetik çeşitliliğini geliştirmede kullanılabilecek önemli genetik kaynaklar olduğunu bildirmişlerdir.

Nohutun en yakın atası olarak bilinen *C. reticulatum* ve *c. echinospermum* türleri ile bazı morfolojik özelliklerini incelediğimiz çalışmanın sonucu olarak özellikler açısından yabani genotiplerin geniş varyasyona sahip olduğu ve bu genotiplerin genetik zenginliğinin yapılacak ıslah çalışmaları için tercih edilerek geliştirilebileceği düşünülmektedir.

## Kaynakça

- Bellucci, E., Mario Aguilar, O., Alseekh, S., Bett, K., Brezeanu, C., Cook, D., ... & Papa, R. (2021). The Increase project: Intelligent collections of food-legume genetic resources for European agrofood systems. *The Plant Journal*, 108(3), 646–660. doi:10.1111/tpj.15472
- Bohra, A., Tiwari, A., Kaur, P., Ganie, S. A., Raza, A., ... & Varshney, R. K. (2022). The key to the future lies in the past: Insights from grain legume domestication and improvement should inform future breeding strategies. *Plant and Cell Physiology*, 63(11), 1554-1572. doi:10.1093/pcp/pcac086
- Croser, J. S., Ahmad, F., Clarke, H. J., & Siddique, K. H. M. (2003). Utilisation of wild *Cicer* in chickpea improvement-progress, constraints, and prospects. *Australian Journal of Agricultural Research*, 54(5), 429-444. doi:10.1071/AR02157
- Danehlouepour, N., Yan, G., Clarke, H. J., & Siddique, K. H. M. (2006). Successful stem cutting propagation of chickpea, its wild relatives and their interspecific hybrids. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46(10), 1349-1354. doi:10.1071/EA05207
- Demirci, Ö., & Bildirici, N. (2020). Şanhurfa ekolojik koşullarında yetiştirilen bazı nohut (*Cicer arietinum* L.) çeşitlerinin verim ve verim unsurlarının belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 20, 656-662. doi:10.31590/ejosat.754332
- FAO. (2020). Dünya nohut ekim alanı ve üretimi. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> Erişim tarihi: 28.10.2022.
- GenStat, 2009. Genstat for windows (12th edition) introduction. VSN International, Hemel Hempstead.
- Güngör, H., & Dumlupınar, Z. (2018). Bazı nohut çeşit ve hatlarının verim ve verim unsurları bakımından değerlendirilmesi. *Derim*, 35(2), 194-200. doi:10.16882/derim.2018.444157
- Jaiswal, H. K., & Singh, R. K. (1990). Breeding for increased nitrogen fixing ability among wild and cultivated species of chickpea. *Annals of Applied Biology*, 117(2), 415-419. doi:10.1111/j.1744-7348.1990.tb04228.x
- Karaköy, T., Ton, A & Anlarsal, A.E. (2018) Genotype x environment interactions and stability analysis for the yield and yield components in winter chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(9), 6291-6296.

- Karaman, M. (2020). Evaluation of yield and quality performance of some spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under rainfall conditions. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*, 4(1), 19-26. doi:10.31015/jaefs.2020.1.4
- Kashiwagi, J., Krishnamurthy, L., Upadhyaya, H. D., Krishna, H., Chandra, S., Vadez, V., & Serraj, R. (2005). Genetic variability of drought-avoidance root traits in the mini-core germplasm collection of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Euphytica*, 146(3), 213-222. doi:10.1007/s10681-005-9007-1
- Kaya, M., & Şanlı, A. (2008). Ekim derinliğinin nohut (*Cicer arietinum* L.) çeşitlerinde kök ve toprak üstü organlarının ilk gelişmesine etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 115-122.
- Kim, D. H., Kaashyap, M., Rathore, A., Das, R. R., Parupalli, S., ... & Varshney, R. K. (2014). Phylogenetic diversity of Mesorhizobium in chickpea. *Journal of Biosciences*, 39(3), 513-517. doi:10.1007/s12038-014-9429-9
- MSTAT-C (1988) MSTAT-C, a Microcomputer Program for the Design, Arrangement, and Analysis of Agronomic Research. Michigan State University East Lansing, East Lansing.
- Redden, R. J., & Berger, J. D. (2007). Chickpea breeding and management. S.S. Yadav, R. J. Redden W. Chen B. Sharma (Eds.), *History and origin of chickpea*. 1, (pp 1-13). London, UK: CABI Press.
- Sharma, S., Lavale, S. A., Nimje, C., & Singh, S. (2021). Characterization and identification of annual wild *Cicer* species for seed protein and mineral concentrations for chickpea improvement. *Crop Science*, 61(1), 305-319. doi:10.1002/csc2.20413
- Singh, K. B., & Ocampo, B. (1997). Exploitation of wild *Cicer* species for yield improvement in chickpea. *Theoretical and Applied Genetics*, 95(3), 418-423. doi:10.1007/s001220050578
- Singh, S., Gumber, R. K., Joshi, N., & Singh, K. (2005). Introgression from wild *Cicer reticulatum* to cultivated chickpea for productivity and disease resistance. *Plant Breeding*, 124(5), 477-480. doi:10.1111/j.1439-0523.2005.01146.x
- Singh, M., Malhotra, N., & Singh, K. (2021). Broadening the genetic base of cultivated chickpea following introgression of wild *Cicer* species-progress, constraints and prospects. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68(6), 2181-2205. doi:10.1007/s10722-021-01173-w
- Ton, A., & Anlarsal, A. E. (2018). Genetic parameters and path coefficient analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(5A), 3728-3732.
- Topçu, M., & Akçura, M. (2022). Bazı nohut çeşitlerinin verim ve verim unsurlarının incelenmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 10(1), 191-198. doi:10.33202/comuagri.995293
- Upadhyaya, H. D., & Ortiz, R. (2001). A mini core subset for capturing diversity and promoting utilization of chickpea genetic resource incrop improvement. *Theoretical and Applied Genetics*, 102, 1292-1298. doi:10.1007/s00122-001-0556-y
- Von Wettberg, E. J., Chang, P. L., Başdemir, F., Carrasquilla-Garcia, N., Korbu, L. B., ... & Cook, D. R. (2018). Ecology and genomics of an important crop wild relative as a prelude to agricultural innovation. *Nature Communications*, 9(1), 1-13. doi:10.1038/s41467-018-02867-z



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Van'ın Erciş, Gevaş ve Edremit ilçelerinde Biber, Domates ve Kavundan *Fusarium* spp. ve *Rhizoctonia* spp.'nin Teşhisi ve Patojeniteleri

Necmettin TENİZ<sup>\*1</sup>, Emre DEMİRER DURAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, 65100, Van, Türkiye

<sup>2</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, 65040, Van, Türkiye

Necmettin TENİZ, ORCID No: 0000-0002-8710-5416, Emre DEMİRER DURAK, ORCID No: 0000-0001-5757-6332

\*Sorumlu yazar: ncmtn.523@gmail.com

#### Makale Bilgileri

Geliş: 20.12.2022  
Kabul: 03.03.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1221987

#### Anahtar Kelimeler

Anastomosis grup,  
*Fusarium*,  
Patojenite,  
*Rhizoctonia*

**Öz:** Van'ın Erciş, Gevaş ve Edremit ilçelerinde yetiştirilen domates, biber ve kavun bitkilerinin köklerinden izole edilen *Rhizoctonia* ve *Fusarium* türlerini teşhis etmek ve patojenitelerini belirlemek bu çalışmanın amacını oluşturmuştur. Sürvey çalışmaları 2018 yılında yapılmış ve domates örneklerinden 6 *Rhizoctonia*, 31 *Fusarium*, biber örneklerinden 4 *Rhizoctonia*, 6 *Fusarium*, kavun örneklerinden 10 *Fusarium* olmak üzere toplam 57 fungal izolat elde edilmiştir. *Fusarium* ve *Rhizoctonia* izolatlarının tür teşhisleri klasik yöntemlerle yapılmış, *Rhizoctonia* anastomosis grupları (AG) test izolatları ile eşleştirilerek belirlenmiştir. Buna göre *Rhizoctonia* izolatları; binükleik AG-K (domatesten 2 izolat), *Rhizoctonia solani* AG-4 (domatesten 2 izolat), *R. solani* AG-2 (domatesten 2, biberden 1 izolat), *R. solani* AG-3 (biberden 2 izolat) ve *R. solani* AG-5 (biberden 1 izolat) olarak belirlenmiştir. *Fusarium* izolatları ise; *F. oxysporum* (kavundan 6, biberden 3, domatesten 18 izolat), *F. solani* (kavundan 2, biberden 3, domatesten 13 izolat) ve *F. equiseti* (kavundan 2 izolat) olarak tespit edilmiştir. Patojenite denemesinde sayılarının az olması nedeniyle izole edilen bütün *Rhizoctonia* izolatları ile bölgeleri temsil edecek şekilde seçilen 14 *Fusarium* izolatı kullanılmıştır. Deneme sonucunda *Fusarium* izolatlarında biberde *F. solani*'nin, domates ve kavunlarda *F. oxysporum*'un daha patojen oldukları belirlenmiştir. *Rhizoctonia* türlerinde ise biberlerde *R. solani* AG-3'ün, domateslerde *R. solani* AG-4 ve binükleik *Rhizoctonia* AG-K'nın daha patojen olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak biberden *R. solani* AG-5 ve *R. solani* AG-3, domates ve biberden *R. solani* AG-2, domatesten binükleik *Rhizoctonia* AG-K Van'da ilk defa bu çalışma ile izole edilmiş ve anastomosis grupları belirlenmiştir.

### Diagnosis and Pathogenicity of *Fusarium* spp. and *Rhizoctonia* spp. from Pepper, Tomato and Melon in Erciş, Gevaş and Edremit districts of Van

#### Article Info

Received: 20.12.2022  
Accepted: 03.03.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1221987

#### Keywords

Anastomosis group,  
*Fusarium*,  
Pathogenicity,  
*Rhizoctonia*

**Abstract:** The aim of this study was to identify *Rhizoctonia* and *Fusarium* species isolated from the roots of tomato, pepper and melon plants grown in Erciş, Gevaş and Edremit districts of Van and to determine their pathogenicity. Survey studies were carried out in 2018 and a total of 57 fungal isolates were obtained, 6 *Rhizoctonia*, 31 *Fusarium* from tomato samples, 4 *Rhizoctonia*, 6 *Fusarium* from pepper samples, and 10 *Fusarium* from melon samples. Species identification of *Fusarium* and *Rhizoctonia* isolates were made by classical methods, and *Rhizoctonia* anastomosis groups (AG) were determined by matching with test isolates. Accordingly, *Rhizoctonia* isolates; binucleic AG-K (2 isolates from tomato), *Rhizoctonia solani* AG-4 (2 isolates from tomato), *R. solani* AG-2 (2 isolates from tomato, 1 isolate from pepper), *R. solani* AG-3

(2 isolates from pepper) and *R. solani* AG-5 (1 isolate from pepper). *Fusarium* isolates were identified as *F. oxysporum* (6 isolates from melon, 3 isolates from pepper, 18 isolates from tomato), *F. solani* (2 isolates from melon, 3 isolates from pepper, 13 isolates from tomato) and *F. equiseti* (2 isolates from melon). In the pathogenicity experiment, 14 *Fusarium* isolates were selected to represent the regions and all *Rhizoctonia* isolates isolated due to their low numbers were used. As a result of the experiment, it was determined that *F. solani* in pepper and *F. oxysporum* in tomatoes and melons were more pathogenic in *Fusarium* isolates. In *Rhizoctonia* species, *R. solani* AG-3 in peppers, *R. solani* AG-4 and binucleic *Rhizoctonia* AG-K in tomatoes were found to be more pathogenic. In this study, *R. solani* AG-5 and *R. solani* AG-3 from pepper, *R. solani* AG-2 from tomato and pepper, binucleic *Rhizoctonia* AG-K from tomato were isolated and anastomosis groups were determined for the first time in Van.

## 1. Giriş

*Cucurbitaceae* familyasından kavun ve *Solanaceae* familyasından domates ile biber beslenme açısından oldukça önemli olmakla beraber dünya genelinde yüksek oranda tarımı yapılan bitkilerdir. Dünyada FAO'nun 2019 kayıtlarına göre domates 182.301.395 milyon ton, biber 36.512.019 milyon ton ve kavun 118.413.465 milyon ton üretimleri ile yetiştiricilikte ilk sıralarda yer almaktadır (FAO, 2019).

Genel olarak bakıldığında dünyada ve ülkemizde domates, biber ve kavun bitkileri önemli ölçüde yetiştiriciliği yapılan, üretimlerinde süreklilik gerektiren vazgeçilemez besin kaynaklarıdır. Dünya üzerinde yapılan tüm tarım alanlarında olduğu gibi bu bitkilerin yetiştirildiği alanlarda önemli verim kayıplarına yol açan fitopatolojik sorunlar mevcuttur. Bu sorunların başında ise toprak kaynaklı patojenlerin özellikle fungusların neden olduğu hastalıklar yer almaktadır (Soylu ve ark., 2020). Domates, biber ve kavunda en tahripkar patojenlerin özellikle *Fusarium* ve *Rhizoctonia* cinslerine ait bazı türler olduğu yapılan birçok çalışma ile kanıtlanmıştır (Ozan & Maden, 2004; Boyraz & Baştaş, 2005; Smiley ve ark., 2005; Demir ve ark., 2006; Akarca, 2013; Yıldırım, 2017; Bilici ve ark., 2021). Kök ve kök boğazı hastalıklarının başlıcaları olan *Fusarium* spp. ve *Rhizoctonia* spp. bitkilerin köklerinden giriş yaparak yukarı doğru ilerler veya bitki dokularına doğrudan fungal penetrasyon ile enfeksiyonu gerçekleştirirler. Bunun sonucunda bitkide solgunluk, kloroz, bodurlaşma ve ileri durumlarda ölüm gibi belirtiler ortaya çıkmaktadır (Shanmugam ve ark., 2009).

Geniş konukçu aralığına sahip, toprak kaynaklı bir patojen olan *Fusarium* cinsinin çok sayıda patojen türü mevcuttur (Fravel & Gardener, 2002). Özellikle domateste *Fusarium oxysporum*' un kök ve kök boğazı çürüklüğüne neden olan tür olduğu bildirilmiştir (Attitalla ve ark., 2004). Biberde de özellikle *F. oxysporum*' un, son yıllarda da *F. solani*' nin kök ve kök boğazı çürüklüğü oluşturduğu farklı çalışmalarla rapor edilmiştir (Göçmen & Abak, 2006; Yücel ve ark., 2013; Pérez-Hernández ve ark., 2014; Cerkauskas, 2017; Güler Güney & Güldür, 2018). Bu cinse bağlı olan *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis* ise, kavun bitkisine özelleşmiş ve kavun yetiştiriciliği yapılan alanlarda ciddi problemlere yol açan bir türdür (Baran, 2000). Bu türler dışında diğer bazı *Fusarium* türleri de bu bitkilerde solgunluğa sebebiyet verebilmektedir (Altuğ & Erzurum, 2001).

*Rhizoctonia* spp., bitkilerde çeşitli hastalıklara neden olan, dünyanın birçok bölgesinde yaygın olarak bulunan, geniş konukçu çevresine sahip fungal etmenlerdir (Ogoshi ve ark., 1996; Carling ve ark., 2002). *Rhizoctonia* funguslarının hiflerinin birbiriyle uyumlu olması ve temas noktalarının kaynaşmasıyla "anastomosis grup (AG)" olarak adlandırılan alt gruplar oluşmaktadır (Sneh ve ark., 1996). Aynı zamanda vejetatif hif hücrelerindeki çekirdek sayısına ve öncül hifin genişliğine göre çok çekirdekli (Multinukleik, MN), iki çekirdekli (Binukleik, BN) ve tek çekirdekli (uninukleik) olarak isimlendirilirler. *R. solani*, çok çekirdekli tür olup (Kronland & Stanghellini, 1988) domates yetiştiriciliği yapılan alanlardan gerçekleştirilen izolasyonlarda çoğunlukla *R. solani* AG-4' ün bulunduğu rapor edilmiştir (Yıldız & Döken 2002; Demirer Durak & Ok, 2017). Bununla beraber biber ve kavun bitkilerinde de ciddi derecede verim kayıplarına neden olduğu araştırmalar neticesinde ortaya konmuştur (Zvirin ve ark., 2010; Akarca, 2013; Yıldırım, 2017).

Yerkürede artış gösteren nüfus ve besin ihtiyacına paralel artan bitkisel üretimde en önemli sınırlayıcı etmenlerin başında patojenlerin geldiği düşünüldüğünde tarım alanlarında hastalıkların

belirlenmesi, tanımlanması ve hastalık şiddetlerinin ölçülmesi de aynı zamanda önem teşkil etmektedir. Bu bağlamda çalışmanın genel amacı, Van ilinin bazı ilçelerinde yetiştirilen domates, biber ve kavun bitkilerinden *Fusarium* spp. ve *Rhizoctonia* spp.'nin izolasyonları, tür teşhisleri ve patojenite durumlarını belirlemek olmuştur.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Materyal

Çalışmada surveyler esnasında yetiştiricilerden alınan bilgilere göre en çok kullanılan tohum çeşitleri belirlenmiş ve kavun (Lokum F1 Hibrid çeşidi), domates (Alsancak F1 Hibrit çeşidi) ile sivri biber (Bafra F1 Hibrid çeşidi) tohumları özel bir şirketten temin edilmiştir. Test fungusları olan *Fusarium* spp. ve *Rhizoctonia* spp. izolatları, Van ili Gevaş, Edremit ve Erciş ilçelerinden surveyler sonucu izole edilmiştir.

### 2.2. Yöntem

#### 2.2.1. Survey çalışmaları ve hastalıklı bitkilerden örneklerin alınması

Survey çalışmaları, Van'da önemli derecede yetiştiriciliği yapılan domates, biber ve kavun ekim alanlarına göre Gevaş, Edremit ve Erciş ilçelerinde yürütülmüştür. Bu çerçevede hastalıklı olduğu düşünülen toplam 179 bitkinin tesadüfi olarak kök bölgesinden örnekler alınmıştır. Bu örnekler etiketler verilerek polietilen torbalar içerisinde işlem yapılıncaya kadar buzdolabında +4 °C'de tutulmuşlardır.

#### 2.2.2. Bitki örneklerinden fungus izolasyonu

Kökler, çeşme suyu ile topraktan arındırıldıktan sonra semptomlu-sağlam doku içerecek şekilde 2-5 mm büyüklüğünde parçalar halinde kesilmiştir. Yüzeysel sterilizasyon işlemi için kesilen parçalar 2 dakika %1'lik NaOCl (Sodyum Hipoklorid) çözeltisinde bekletilmiş, 1 dakika steril distile su (sdH<sub>2</sub>O) içerisinde 2 defa durulanmıştır. Kurutma kâğıdına alınan parçalar, bakteri gelişimini engellemek amacıyla ortama katılan streptomisin sülfatlı (100 mg/L) Su Agarı (SA) ve Patates Dekstroz Agarı (PDA) besi ortamlarına 3'er tekerrürlü olacak şekilde ekilmiştir. Daha sonra besi ortamları 24±2°C'li inkübatöre bırakılarak, 7 gün boyunca takibe alınmıştır. Bu süre içerisinde *Fusarium* ve *Rhizoctonia* izolatlarına ait koloniler gözlemlenerek, alt kültüre alınmış ve 5 gün inkübe edilmiştir. Bu alt kültürlerden saf kültür elde etmek amacıyla funguslar saflaştırılmıştır. Bu işlem *Fusarium* sporları için tek spor izolasyon yöntemi, *Rhizoctonia* hifleri için hif ucu izolasyonu yapılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu izolatlar PDA içeren test tüplerinde +4°C'de saklanmışlardır.

#### 2.2.3. *Rhizoctonia* izolatlarının tanımlanması ve anastomosis gruplarının belirlenmesi

Besi ortamlarında (PDA ve SA) 25°C'de 7 gün inkübe edilen *Rhizoctonia* izolatlarının tanımlanması Ogoshi (1975)'e göre yapılmıştır. Saflaştırılan izolatların anastomosis gruplarını saptamak için, daha önceden moleküler yöntemlerle teşhisleri yapılmış test izolatları Prof. Dr. Erkol Demirci ve Doç. Dr. Emre Demire Durak'ın kültür koleksiyonundan temin edilerek kullanılmıştır. Bu test izolatları ile çalışma kapsamında izole edilen izolatlardan steril mantar delici ile kesilen 5 mm'lik miselyum diskleri, besi ortamına 4 cm uzaklıkta karşılıklı olarak ekilmiştir. Daha sonra bu ortamlar 25°C'de 48-72 saat kadar inkübe edilmiştir. Işık mikroskobu ile yapılan incelemelerde kolonilerin birbirlerine doğru geliştikleri kısımdaki hiflerin kaynaşma noktalarında hücre duvarı ve sitoplazmik birleşme olup olmadığı belirlenmiştir (Parmeter ve ark., 1969).



## 2.2.4. *Fusarium* izolatlarının morfolojik özellikleri ve tanılanması

Saflaştırılan izolatlar teşhis amacıyla PDA ve SA ortamlarına bırakılmış, 7 gün 25°C'de inkübe edilmişlerdir. Gelişen kolonilerin makroskopik ve mikroskopik incelemeleri yapılmıştır. Koloni morfolojisi, makrokonidi, mikrokonidi, klamidospore ve konidiofor yapıları incelenerek tanıları Gerlach & Nirenberg (1982)'e göre yapılmıştır.

## 2.2.5. Patojenite testi

Patojenite testi için domates, biber ve kavun tohumları steril torf-perlit (2:1 oranında) bulunan viyollere ekilmiş ve gelişen fidelerin gerçek yaprak çıkışlarından sonra 18x18 cm'lik steril saksılara şaşırtılmıştır. Şaşırtma işleminden 1 hafta sonra, hastalık inokulasyonları yapılmıştır. Bu işlem için öncelikle hastalık inokulumları hazırlanmıştır. *Rhizoctonia* izolatları için inokulum ortamı olarak buğday taneleri kullanılmıştır. Buğdaya sardırma yönteminde saf su ile nemlendirilen taneler 2 gün üst üste 121°C'de 1 saat olmak üzere otoklav edilmiş ve petrilere konulmuştur. Daha sonra bir haftalık genç *Rhizoctonia* izolatlarından üçer misel parçası kesilmiş, petrilere bulunan steril buğday tanelerine inokule edilmiş ve petrilere 25°C'ye ayarlı inkübatörde dört hafta kadar tutulmuştur. Misel ile inokule edilmiş buğday tanelerinden her saksıya 15 adet uygulanmıştır (Ichielevich-Auster ve ark., 1985; Botha ve ark., 2003; Sharon ve ark., 2007). Kontrol grubu saksılara ise steril 15 adet buğday tanesi bırakılmıştır. *Fusarium* izolatlarının patojenitesi için genç kolonilerden alınan parçalar ile thoma lamı kullanılarak 1x10<sup>6</sup> konidi/ml spor süspansiyonu hazırlanmıştır. Bu süspansiyondan her bitkiye 20 ml rizosfer bölgesinden içirme şeklinde bulaştırma yapılmıştır. Kontrol grubuna ise 20 ml steril saf su verilmiştir (Nam ve ark., 2009).

Deneme 5 tekerrürlü olarak yürütülmüş ve bitkiler 12 saat aydınlık, 12 saat karanlıktaki iklim odasında 25°C'de tutulmuştur. Yaklaşık 12 hafta sonra deneme sonlandırılarak hastalık şiddetleri değerlendirilmiştir. Hastalık şiddetlerinin belirlenmesinde *Rhizoctonia* için 0-4 skalası; 0 = sağlam bitki, 1 = kök veya gövde kısmında derin olmayan koyu lezyonlar, 2 = kök gelişiminde gerileme, kök veya gövdede geniş lezyonlar, 3 = kök uzunluğu azalmış, yoğun kök çürüklüğü, ana kök veya gövdeyi çevreleyen geniş lezyonlar, 4 = ölmüş bitki (Muyolo ve ark., 1993), *Fusarium* için 0-5 skalası; 0 = sağlam bitki, 1 = kökte az oranda koyuluk, 2 = kökün dörtte birini kaplamış koyu leke ve lezyonlar, 3 = ana kökte belirgin renk değişikliği, enfeksiyon toplam kökün yarısını kaplamış, 4 = yapraklarda solgunluk, kök boğazında lezyonlar, enfeksiyon kökün dörtte üçünü kaplamış, 5 = ölü bitki (Kavroulakis ve ark., 2005) kullanılmıştır. Daha sonra bu skala değerleri kullanılarak Tawsend-Hauberger formülüne göre % olarak hastalık şiddeti indeksi belirlenmiştir.

$$\% \text{ Hastalık Şiddeti İndeksi} = [\Sigma(SD \times BS)] / (ESD \times TB) \times 100 * \quad (1)$$

\*SD: Skala değeri, BS: Aynı skala değerindeki bitki sayısı, ESD: En yüksek skala değeri, TB: Toplam bitki sayısı.

Deneme sonunda bitkinin bazı gelişim parametreleri değerlendirilmiştir. Bitkilerin kök uzunlukları cetvel yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir. Daha sonra bitkinin yaş ağırlığında, kök boğazından kesilen yeşil aksam tartılmıştır; kök kısmı ise çeşme suyuyla temizlenip nemi alındıktan sonra tartılarak belirlenmiştir. Bu aksamlar 48 saat 70°C'lik fırında tutulduktan sonra da kuru ağırlıkları tartılarak tespit edilmiştir (Botha ve ark., 2003; Sharon ve ark., 2007). *Fusarium* ve *Rhizoctonia* izolatlarının bitkilerdeki varlıklarının ispatı için köklerden re-izolasyonlar yapılmış, gelişen koloniler incelenerek türler doğrulanmıştır.

Çalışma 5 tekrar ve tamamen rastgele bir düzene dayalı olarak kurulmuştur. Elde edilen veriler ise SPSS yazılımı kullanılarak tek yönlü ANOVA'ya tabi tutulmuştur. Tüm ortalama verilerin karşılaştırılması Duncan çoklu karşılaştırma testine göre yapılmıştır.

## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1. Survey çalışmaları ve elde edilen funguslar

Van ilinin Erciş, Gevaş ve Edremit ilçelerinde açıkta yetiştirilen alanlardan yapılan surveyler sonucunda hastalık belirtileri gösteren domates bitkilerinden 63, biberden 60 ve kavundan 56 olmak

üzere toplamda 179 örnek toplanmıştır. Bitkilerin köklerinden yapılan izolasyonlar sonucunda domateste 37, biberde ve kavunda 10 olmak üzere toplam 57 örnekten hedef fungusların izolasyonu ve morfolojik-mikroskopik özelliklerine göre teşhisleri yapılmıştır (izelge 1).

Çizelge 1. Çalışmada izole edilen tüm funguslar, türleri ve izole edildikleri bitkiler

İzole edilen funguslar	Domates	Biber	Kavun	Toplam
<i>Fusarium solani</i>	13	3	2	18
<i>Fusarium oxysporum</i>	18	3	6	27
<i>Fusarium equiseti</i>	-	-	2	2
<i>Rhizoctonia solani</i> (AG-3)	-	2	-	2
<i>Rhizoctonia solani</i> (AG-2)	2	1	-	3
<i>Rhizoctonia solani</i> (AG-5)	-	1	-	1
Binükleik <i>Rhizoctonia</i> (AG-K)	2	-	-	2
<i>Rhizoctonia solani</i> (AG-4)	2	-	-	2
Toplam	37	10	10	56

### 3.2. Çalışmada elde edilen *Fusarium* ve *Rhizoctonia* funguslarının türleri

Yapılan tür teşhislerine göre; kavundan izole edilen *Fusarium* izolatları (toplam 10 adet), *F. solani* (2 adet), *F. oxysporum* (6 adet), *Fusarium equiseti* (2 adet), biberden izole edilen *Fusarium* izolatları (toplam 6 adet) *F. solani* (3 adet), *F. oxysporum* (3 adet), domatesten izole edilen *Fusarium* izolatları da (toplam 31 adet) *F. solani* (13 adet), *F. oxysporum* (18 adet) olarak belirlenmiştir (izelge 1). Anastomosis grupları saptanan *Rhizoctonia* izolatları ise; biberden *R. solani* AG-3 (2 adet), *R. solani* AG-5 (1 adet) ve *R. solani* AG-2 (1 adet), domatesten *R. solani* AG-3 (2 adet), *R. solani* AG-2 (2 adet) ve binükleik AG-K (2 adet) olarak belirlenmiştir (izelge 2). Bu çalışmada kavundan *Rhizoctonia* izole edilmemiştir. Patojenite denemesinde sayılarının az olması sebebiyle elde edilen tüm *Rhizoctonia* spp. izolatları ile *Fusarium* spp. izolatlarının tüm bölgeleri temsil edebilenleri kullanılmıştır.

Çizelge 2. Patojenite testinde kullanılan izolatların elde edildiği lokasyonlar, kodları, türleri ve izole edildiği bitkiler

İzole edilen bölgeler	İzolat isimleri	İzole edildiği bitki
Erciş/Kocapınar	N.Tc1( <i>F. solani</i> )	Domates
Edremit/Enginsu	N.GATa4( <i>F. solani</i> )	Domates
Edremit/Andaç	N.Ea3( <i>F. oxysporum</i> )	Domates
Gevaş/Atalan	N.GATd2( <i>F. oxysporum</i> )	Domates
Gevaş/Atalan	N.GATd3( <i>F. oxysporum</i> )	Domates
Gevaş/Aladüz	N.GATa2( <i>Rhizoctonia solani</i> AG-2)	Domates
Gevaş/Aladüz	N.GATa1( <i>Rhizoctonia solani</i> AG-2)	Domates
Edremit/Anda	N.GATd4( <i>Rhizoctonia solani</i> AG-4)	Domates
Edremit/Anda	N.GATd5( <i>Rhizoctonia</i> AG-K)	Domates
Gevaş/Aladüz	N.GATe2( <i>Rhizoctonia</i> AG-K)	Domates
Gevaş/Atalan	N.GATa5( <i>Rhizoctonia solani</i> AG-4)	Domates
Edremit/Enginsu	N.GATe3( <i>F. oxysporum</i> )	Biber
Edremit/Enginsu	N.GATe( <i>F. oxysporum</i> .)	Biber
Gevaş/Atalan	N.GATd2( <i>F. oxysporum</i> .)	Biber
Edremit/Enginsu	N.GATe4( <i>Rhizoctonia solani</i> AG-2)	Biber
Gevaş/Aladüz	N.GATb2( <i>Rhizoctonia solani</i> AG-5)	Biber
Erciş/Kocapınar	N.Eb1( <i>Rhizoctonia solani</i> AG-3)	Biber
Gevaş/Atalan	N.GATa( <i>Rhizoctonia solani</i> AG-3)	Biber
Erciş/Göze	N.Ea( <i>F. solani</i> )	Kavun
Erciş/Göze	N.Ea1( <i>F. equiseti</i> )	Kavun
Erciş/Göze	N.Ea2( <i>F. solani</i> )	Kavun
Erciş/Göze	N.Ea3( <i>F. oxysporum</i> )	Kavun
Erciş/Kuzluca	N.Ea4( <i>F. oxysporum</i> .)	Kavun
Erciş/Kuzluca	N.Ea5( <i>F. equiseti</i> )	Kavun

### 3.3. Domateste patojenite testi

Patojenite denemesi sonucunda domatesten izole edilen *Fusarium* spp. ve *Rhizoctonia* spp. izolatlarının, bitki morfolojik gelişim kriterlerine ve hastalık şiddetlerine etkileri Çizelge 3'te verilmiştir. Uygulamalar ile domates gelişim değerleri arasındaki farklar istatistiki açıdan önemli bulunmuştur ( $P<0.05$ ). Bu çerçevede, sürgün yaş/kuru ağırlığında en düşük değere sahip izolatın NGATa2 (*R. solani* AG-2), kök yaş/kuru ağırlığında ise NGATa5 (*R. solani* AG-4) olduğu saptanmıştır. Ayrıca NGATd4 (*R. solani* AG-4) izolatında ise bitki kök uzunluğu değerinin en düşük olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak bakıldığında ise uygulanan tüm patojen izolat grupları bitkiyi olumsuz yönde etkilemiştir. Ayrıca NTC1 (*F. solani*) izolatının en yüksek skağeri (3.4) ile hastalık şiddetine (% 85) sahip olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 3). NGATa4 (*F. solani*) izolatının ise en düşük skalaya (0.8) ve hastalık şiddetine (%25) sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3. *Fusarium* ve *Rhizoctonia* izolatlarının domates bitkisinin morfolojik gelişim parametrelerine olan etkisi, skala değeri ve hastalık şiddeti indeksi

Uygulama Grupları	SYA*(g)	KYA*(g)	SKA*(g)	KKA*(g)	KU*(cm)	Skala	HŞİ** (%)
	$\bar{x} \pm S.S.$ ***	$\bar{x} \pm S.S.$	$\bar{x} \pm S.S.$	$\bar{x} \pm S.S.$	$\bar{x} \pm S.S.$		
K****	91.6±7.2 <sup>a****</sup>	17.9±1.7 <sup>a</sup>	13.1±0.7 <sup>a</sup>	1.6±0.1 <sup>a</sup>	32.8 ±2.6 <sup>a</sup>	-	-
NTC1( <i>F. solani</i> )	51.3±7.2 <sup>def</sup>	5.0±1.4 <sup>c</sup>	6.1±0.6 <sup>de</sup>	0.4±0.1 <sup>c</sup>	20.6 ±4.6 <sup>bcd</sup>	3.4	85
NGATa4 ( <i>F. solani</i> )	71.6±4.9 <sup>b</sup>	11.5±2.2 <sup>b</sup>	10.4±1.2 <sup>b</sup>	1.1±0.1 <sup>b</sup>	23.8 ±3.2 <sup>b</sup>	0.8	25
NEa3 ( <i>F. oxysporum</i> )	69.1±5.8 <sup>bc</sup>	9.2±1.7 <sup>b</sup>	9.0±1.1 <sup>bc</sup>	0.8±0.2 <sup>b</sup>	19.0 ±1.8 <sup>cde</sup>	2.6	65
NGATd2 ( <i>F. oxysporum</i> )	64.1±10.4 <sup>bcd</sup>	10.7±2.9 <sup>b</sup>	9.1±1.8 <sup>bc</sup>	0.8±0.2 <sup>b</sup>	22.6 ±3.0 <sup>bc</sup>	1.2	30
NGATd3 ( <i>F. oxysporum</i> )	69.4±20.2 <sup>cdef</sup>	11.3±6.3 <sup>b</sup>	8.2±0.7 <sup>bcd</sup>	0.8±0.4 <sup>b</sup>	24.8 ±3.4 <sup>b</sup>	1	27
NGATa1( <i>R. solani</i> AG-2)	46.2±5.1 <sup>f</sup>	3.8±1.5 <sup>cd</sup>	5.3±0.7 <sup>e</sup>	0.2±0.1 <sup>c</sup>	16.2 ±2.9 <sup>de</sup>	2.6	65
NGATa2( <i>R. solani</i> AG-2)	43.7±11.7 <sup>f</sup>	2.9±1.0 <sup>cd</sup>	5.3±1.8 <sup>e</sup>	0.3±0.2 <sup>c</sup>	18.6 ±2.7 <sup>cde</sup>	1.8	45
NGATd4 ( <i>R. solani</i> AG-4)	49.0±15.2 <sup>ef</sup>	2.8±0.8 <sup>cd</sup>	5.3±1.5 <sup>e</sup>	0.2±0.1 <sup>c</sup>	15.4 ±3.2 <sup>e</sup>	2	50
NGATe2(Binükleik <i>Rhizoctonia</i> AG-K)	49.1±6.2 <sup>ef</sup>	2.2±0.4 <sup>d</sup>	5.8±1.4 <sup>e</sup>	0.2±0.04 <sup>c</sup>	16.4 ±1.8 <sup>de</sup>	2.6	65
NGATd5(Binükleik <i>Rhizoctonia</i> AG-K)	63.4±9.3 <sup>bcd</sup>	4.0±0.6 <sup>cd</sup>	7.1±1.4 <sup>cde</sup>	0.3±0.09 <sup>c</sup>	16.2 ±2.2 <sup>de</sup>	2.6	65
NGATa5( <i>R. solani</i> AG-4)	61.6±10.8 <sup>bcd</sup>	1.3±0.4 <sup>cd</sup>	5.4±1.5 <sup>e</sup>	0.3±0.2 <sup>c</sup>	16.6 ±3.2 <sup>de</sup>	2.4	55

\*SYA: Sürgün Yaş Ağırlık, KYA: Kök Yaş Ağırlık, SKA: Sürgün Kuru Ağırlık, KKA: Kök Kuru Ağırlık, KU: Kök Uzunluğu

\*\* : Hastalık şiddeti indeksi *Fusarium* için 0-5 ve *Rhizoctonia* için 0-4 skalası üzerinden yüzde olarak Tawsend-Haubergger formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

\*\*\*: Parametre ölçümlerinde elde edilen ortalama değerler ve standart sapma verileri

\*\*\*\*: Aynı sütundaki farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki fark önemlidir ( $P<0.05$ ).

\*\*\*\*\*: Kontrol

Domateste hem *Fusarium* hem de *Rhizoctonia* izolatlarının bitki gelişimini azalttığı tespit edilmiş ve hastalık şiddetlerinin %20-85 arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Nitekim, Malatya, Elazığ ve Van gölü havzasında daha önce yapılan araştırmalarda bu çalışma sonuçları ile benzer şekilde domateslerde *Fusarium* ve *Rhizoctonia* türlerinin önemli sorun olduğu ve hastalık meydana getirdiği rapor edilmiştir (Kırbağ & Turan, 2005; Mutlu ve ark., 2015; Demirer Durak & Ok, 2017). Bununla beraber bu patojenlerin domates bitkisinin gelişim kriterlerini de azalttığı bilinmektedir (Demirer Durak & Ok, 2019). Diğer çalışmalarda da domatesten farklı anastomosis gruplarına ait izolatlar elde edilmiş fakat en çok AG-4 ile karşılaştığı belirtilmiştir (Demirci & Döken, 1995; Yıldız & Döken, 2002). Elazığ'da domateslerden farklı fungus cinslerinin yanı sıra *R. solani*, *F. solani*, *F. oxysporum*' un da izole edildiği rapor edilmiştir (Kırbağ & Parlak, 1996). Patojenite denemesinde yüksek hastalık şiddeti gösteren Binükleik *Rhizoctonia* AG-K'nın çileklerde patojen olduğu bildirilmiştir (Demirer-Durak & Demirci, 2018).

### 3.4. Biberde patojenite testi

Patojenite denemesi sonucunda biberden izole edilen *Fusarium* spp. ve *Rhizoctonia* spp. izolatlarının, bitkilerde morfolojik gelişim kriterlerine ve hastalık şiddetlerine etkileri Çizelge 4'te verilmiştir. Buna göre, uygulama grupları ile biber gelişim değerleri arasındaki farkların istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmiştir (Sürgün kuru ağırlık hariç) ( $P<0.05$ ). Bu kapsamda, NGATe4 (Rhiz. AG-2) ve NEb1 (Rhiz. AG-3) izolatları sürgün yaş ağırlığına etki etmezken diğer izolatların bu

parametreyi düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca sürgün kuru ağırlık dışında diğer gelişim kriterlerini patojen izolatların azalttığı tespit edilmiştir. Skala değerlendirmesinde ise en yüksek değer 2.5 ile NGATd3 (*F. solani*) izolatında tespit edilirken, bu izolatın %50 oranında da hastalık şiddeti oluşturduğu belirlenmiştir. En düşük skala ve hastalık şiddeti değerlerinin ise NGATe4 (*Rhiz. AG-2*) izolatında olduğu saptanmıştır. Sonuçlarda yapılan değerlendirmeler neticesinde *Fusarium* izolatlarının parametre değerlerinin diğer uygulamalara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4. *Fusarium* ve *Rhizoctonia* izolatlarının biber bitkisinin morfolojik gelişim parametrelerine olan etkisi ile skala değeri ve hastalık şiddeti indeksi

Uygulama Grupları	SYA*(g)	KYA*(g)	SKA*(g)	KKA*(g)	KU*(cm)	Skala	HŞİ**(% )
	$\bar{x} \pm S.S.$ ***	$\bar{x} \pm S.S.$	$\bar{x} \pm S.S.$	$\bar{x} \pm S.S.$	$\bar{x} \pm S.S.$		
K*****	33.7±4.8 <sup>a*****</sup>	19.0±1.1 <sup>a</sup>	5.6±0.8 <sup>a</sup>	1.5±0.3 <sup>a</sup>	36.6±3.1 <sup>a</sup>	-	-
NGATe4( <i>R. solani</i> AG-2)	30.1±5.06 <sup>a</sup>	15.7±1.1 <sup>b</sup>	3.4±1.1 <sup>a</sup>	0.3±0.2 <sup>b</sup>	21.3±2.1 <sup>bc</sup>	1.3	26.6
NGATb2( <i>R. solani</i> AG-5)	26.4±2.9 <sup>b</sup>	16.6±1.2 <sup>b</sup>	2.4±0.3 <sup>a</sup>	0.4±0.1 <sup>bc</sup>	23.3±2.1 <sup>b</sup>	1.5	30
NEb1( <i>R. solani</i> AG-3)	31.7±5.5 <sup>a</sup>	17.3±1.4 <sup>ab</sup>	5.0±1.3 <sup>a</sup>	0.5±0.3 <sup>bc</sup>	21.0±1.5 <sup>bc</sup>	2.1	43.3
NGATa( <i>R. solani</i> AG-3)	22.2±4.1 <sup>b</sup>	13.0±2.6 <sup>d</sup>	2.1±0.4 <sup>a</sup>	0.2±0.1 <sup>c</sup>	19.3±1.8 <sup>c</sup>	1.8	36.6
NGATe3( <i>F. oxysporum</i> )	22.2±5.6 <sup>b</sup>	13.0±2.4 <sup>d</sup>	2.9±0.3 <sup>a</sup>	0.5±0.1 <sup>bc</sup>	20.5±3.3 <sup>bc</sup>	1.6	33.3
NGATe( <i>F. oxysporum</i> )	21.1±3.0 <sup>b</sup>	13.5±2.1 <sup>d</sup>	2.3±0.5 <sup>a</sup>	0.5±0.3 <sup>bc</sup>	22.0±0.8 <sup>bc</sup>	1.5	30
NGATd2( <i>F. oxysporum</i> )	24.0±2.2 <sup>b</sup>	13.3±1.9 <sup>d</sup>	2.0±0.6 <sup>a</sup>	0.4±0.2 <sup>c</sup>	22.6±1.5 <sup>bc</sup>	1.6	33.3
NGATd3( <i>F. solani</i> )	23.8±2.8 <sup>b</sup>	10.1±2.1 <sup>c</sup>	1.4±0.2 <sup>a</sup>	0.1±0.0 <sup>d</sup>	15.0±2.8 <sup>d</sup>	2.5	50

\*SYA: Sürgün Yaş Ağırlık, KYA: Kök Yaş Ağırlık, SKA: Sürgün Kuru Ağırlık, KKA: Kök Kuru Ağırlık, KU: Kök Uzunluğu

\*\* : Hastalık şiddeti indeksi *Fusarium* için 0-5 ve *Rhizoctonia* için 0-4 skalası üzerinden yüzde olarak Tawsend-Haubergger formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

\*\*\*: Parametre ölçümlerinde elde edilen ortalama değerler ve standart sapma verileri

\*\*\*\*: Aynı sütundaki farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki fark önemlidir (P< 0.05).

\*\*\*\*\*:Kontrol

Uygulanan izolatların tüm bitki gelişim parametrelerine etkisine bakıldığında, genel olarak bitkinin olumsuz etkilendiği, hastalık şiddetinin ise %26.6-50 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu kapsamda Duran ve Özgönen (2014), Antalya bölgesinde biberde *Fusarium spp.* ve *Rhizoctonia spp.*'nin bitki gelişimini olumsuz etkilediği ve yüksek oranlarda hastalık oluşturduğunu rapor etmiştir. Bununla beraber Malatya'da biber yetiştiriciliği yapılan alanlarda da önemli hastalıklara neden olan fungal organizmaların başında *Rhizoctonia* ve *Fusarium* türlerinin geldiği bildirilmiş olup, bitki gelişimini azalttığı ifade edilmiştir (Kirbağ & Turan, 2005). Erzincan'da ise biber bitkilerinden % 85.2 oranında *R. solani* AG-4 izole edildiği, bunu sırayla % 7.4 ile AG-2, % 5 ile AG-6 ve % 2.5 ile AG-3'ün izlediği rapor edilmiştir (Tuncer & Eken, 2013). Van gölü havzasında yapılan bir çalışmada biberlerden binükleik AG-K ile *R. solani* AG-2, AG-3, AG-4 ve AG-5 izole edilmiş, patojenitede en virülant grubun AG-4 olduğu, AG-2'nin bunu izlediği tespit edilmiştir (Demirer-Durak, 2018). Son yıllarda *F. solani*'nin biberde kök ve kök boğazı çürüklüğüne neden olduğu rapor edilmiştir (Yücel ve ark., 2013; Güler Güney & Güldür, 2018). Bu çalışmada da *F. solani* izolatı diğerlerine göre daha yüksek hastalık şiddeti oluşturmuş ve sonuçlar paralellik göstermiştir.

### 3.5. Kavunda patojenite testi

Kavunda yapılan izolasyonlardan *Fusarium* elde edilirken *Rhizoctonia* tespit edilmemiştir. Bu nedenle kavunda patojenite denemesi *Fusarium* izolatları ile kurulmuştur. Deneme sonuçlarına göre *Fusarium* izolatlarının kavun morfolojik gelişim kriterlerine ve hastalık şiddetine etkileri Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. *Fusarium* izolatlarının kavun bitkisinin morfolojik gelişim parametrelerine olan etkisi, skala değeri ve hastalık şiddeti indeksi

Uygulama Grupları	SYA*(g)	KYA*(g)	SKA*(g)	KKA*(g)	KU*(cm)	Skala	HŞİ**(% )
	$\bar{x} \pm S.S.$ ***	$\bar{x} \pm S.S.$	$\bar{x} \pm S.S.$	$\bar{x} \pm S.S.$	$\bar{x} \pm S.S.$		
K*****	138.1±25.4 <sup>a*****</sup>	4.3±1.1 <sup>a</sup>	18.0±2.2 <sup>a</sup>	0.4±0.09 <sup>a</sup>	27.3±9.5 <sup>a</sup>	-	-
NEa2( <i>F. solani</i> )	80.2±7.3 <sup>cd</sup>	2.8±0.7 <sup>bc</sup>	11.4±2.7 <sup>bc</sup>	0.3±0.12 <sup>ab</sup>	21.0±2.7 <sup>b</sup>	2.6	53.6
NEa5( <i>F. equiseti</i> )	100.9±9.7 <sup>b</sup>	2.4±0.6 <sup>c</sup>	13.0±3.3 <sup>b</sup>	0.32±0.15 <sup>ab</sup>	20.0±4.2 <sup>b</sup>	2.3	46.3
NEa( <i>F. solani</i> )	90.9±5.5 <sup>bc</sup>	2.3±0.4 <sup>c</sup>	9.2±0.7 <sup>c</sup>	0.16±0.04 <sup>c</sup>	17.6±2.6 <sup>b</sup>	2.6	53.3

Çizelge 5. *Fusarium* izolatlarının kavun bitkisinin morfolojik gelişim parametrelerine olan etkisi, skala değeri ve hastalık şiddeti indeksi (devam)

Uygulama Grupları	SYA*(g)	KYA*(g)	SKA*(g)	KKA*(g)	KU*(cm)	Skala	HŞİ** (%)
NEa1( <i>F. equiseti</i> )	96.5±20.9 <sup>bc</sup>	3.7±0.9 <sup>ab</sup>	13.4±3.9 <sup>b</sup>	0.41±0.17 <sup>a</sup>	21.6±2.5 <sup>ab</sup>	2.1	51.3
NEa3( <i>F. oxysporum</i> )	71.7±7.8 <sup>d</sup>	2.5±0.9 <sup>c</sup>	8.2±2.3 <sup>c</sup>	0.20±0.07 <sup>bc</sup>	20.0±4.0 <sup>b</sup>	2.8	58.4
NEa4( <i>F. oxysporum</i> )	95.5±13.1 <sup>bc</sup>	1.9±0.48 <sup>c</sup>	13.6±2.8 <sup>b</sup>	0.36±0.16 <sup>ab</sup>	17.8±2.7 <sup>b</sup>	3.3	68.6

\*SYA: Sürgün Yaş Ağırlık, KYA: Kök Yaş Ağırlık, SKA: Sürgün Kuru Ağırlık, KKA: Kök Kuru Ağırlık, KU: Kök Uzunluğu

\*\* : Hastalık şiddeti indeksi *Fusarium* için 0-5 ve *Rhizoctonia* için 0-4 skalası üzerinden yüzde olarak Tawsend-Hauberger formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

\*\*\*: Parametre ölçümlerinde elde edilen ortalama değerler ve standart sapma verileri

\*\*\*\*: Aynı sütündeki farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki fark önemlidir (P< 0.05).

\*\*\*\*\*: Kontrol

Çizelgeye göre kullanılan izolatlar ile bitki gelişim değerleri arasındaki fark istatistiki açıdan önemli bulunmuştur (P<0.05). Sürgün kuru ve yaş ağırlıkta NEa3 (*F. oxysporum*) izolatının en düşük değerde olduğu saptanmıştır. NEa (*F. solani*) ile NEa4 (*F. oxysporum*) izolatlarının bitki kök uzunluklarında en düşük değerlerde olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 5). Skala sonuçlarında en virulent izolatın 3.3 ile % 68.6 hastalık şiddetine sahip NEa4 (*F. oxysporum*) olduğu saptanmıştır. Bu izolatın kök uzunluğunu da en çok azaltan ve en düşük bitki gelişim değerlerine sahip olanlardan biri olduğu belirlenmiştir. NEa5 (*F. equiseti*)' in ise % 46.3 hastalık şiddeti ile patojenitesi en düşük değere sahip izolat olduğu bulunmuştur (Çizelge 5). Bu durum bitki gelişim değerleri ile paralellik göstermiştir. Kullanılan iki *F. solani* izolatının da aynı hastalık şiddeti değeri (% 53) verdiği görülmüştür.

Genel olarak bakıldığında uygulanan tüm izolatların bitki gelişimini olumsuz etkilediği tespit edilirken hastalık şiddeti oranlarının ise % 46.3 - 68.6 arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir (Çizelge 5). Van Gölü Havzası bazı kavun genotipleri açısından ıslah ve seleksiyon için önemli bir gen havuzu içermektedir (Günay, 1993). Geniş kavun varyasyonunun bulunduğu havzada bitki koruma açısından da bazı incelemeler yapılmıştır. Van Gölü Havzası'nda kavun alanlarında yapılan daha önceki çalışmalarda da en önemli fitopatolojik problemlerin başında *Fusarium* spp.'nin özellikle *F. oxysporum* f. sp. *melonis*'in olduğunu bildirilmiştir (Şensoy ve ark., 2013, Demirer Durak & Demirci 2014). Ayrıca *Fusarium* spp.'nin kavunda önemli derecede hastalık oluştururken bitki gelişimini de olumsuz yönde etkilediği bazı araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur (Erzurum, 2000; Demirer Durak, 2016; Erincik ve ark., 2017).

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Van ilinin bazı ilçelerinde yapılan bu çalışmada özellikle ekonomik öneme sahip bitkiler dikkate alınmıştır. Survey çalışmalarında domates ve biber bitkilerinden *Fusarium* spp. ve *Rhizoctonia* spp. izole edilmiş, kavundan ise sadece *Fusarium* spp. elde edilmiştir. Yapılan makroskobik ve mikroskobik incelemelerle *F. oxysporum*, *F. solani* gibi domates, biber ve kavunda sık rastlanılan türlerin belirlenmesinin yanı sıra domates ve biberde özellikle *R. solani* ve domateste binükleik *Rhizoctonia* izolatları da tespit edilmiştir. Bu çalışmayla Van'da ilk defa domatesten binükleik *Rhizoctonia* AG-K, biberden *R. solani* AG-5 ve *R. solani* AG-3, domates ve biberden *R. solani* AG-2 izole edilmiş ve anastomosis grupları belirlenmiştir. Patojenite testlerinde domates ve biberde *F. solani*, kavunda *F. oxysporum* daha yüksek virülanslık gösterirken domateste özellikle binükleik *Rhizoctonia* (AG-K)'ların yüksek hastalık şiddetine neden olmaları dikkat çekicidir. Toprak kaynaklı patojenler üretici açısından büyük problem oluşturmaktadır. Geniş konukçu aralığına sahip olmaları, dayanıklı yapılar oluşturmaları, çeşitli tarım ekosistemlerinde bulunmaları mücadelelerini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle *Fusarium* türlerinin ve *Rhizoctonia* anastomosis gruplarının bilinmesi konukçu tercihleriyle birebir ilişkili olması sebebiyle patojenlerle mücadele açısından son derece önemlidir.

#### Kaynakça

Akarca, Z. (2013). *Erzincan ilinde fasulye bitkilerinin toprak üstü aksamlarından izole edilen Rhizoctonia türlerinin Anastomosis grupları ve patojenitesi*. (Yüksek lisans tezi), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.



- Altuğ, S., & Erzurum, K. (2002). Orta Anadolu bölgesinde kavunda solgunluk hastalığı oluşumunda bazı *Fusarium* türlerinin rolü. *Journal of Agricultural Sciences*, 8(03), 208-211. doi:10.1501/Tarimbil\_0000000738
- Attitalla, I. H., Fatehi, J., Levenfors, J., & Brishammar, S. (2004). A rapid molecular method for differentiating two special forms (*lycopersici* and *radicis-lycopersici*) of *Fusarium oxysporum*. *Mycological research*, 108(7), 787-794. doi:10.1017/S0953756204000322
- Baran, B. (2000). *Güneydoğu Anadolu Bölgesi kavun ekim alanlarında solgunluk hastalığı etmeni "Fusarium oxysporum f. sp. melonis (Leach and Currence)"nin yaygınlığı ve bu etmene karşı bazı kavun çeşitlerinin tepkileri.* (Yüksek lisans tezi), Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Bilici, S., Demir, S., & Boyno, G. (2021). Uçucu yağ ve arbusküler mikorhizal fungus'un domates kök ve kök boğazı çürüklüğü (*Fusarium oxysporum f. sp. radicis lycopersici* Jarvis & Shoemaker) hastalığına etkileri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(2), 857-868. doi:10.21597/jist.790007
- Botha, A., Denman, S., Lamprecht, S. C., Mazzola, M., & Crous, P. W. (2003). Characterisation and pathogenicity of *Rhizoctonia* isolates associated with black root rot of strawberries in the Western Cape Province, South Africa. *Australasian Plant Pathology*, 32, 195-201.
- Boyras, N., & Baştaş, K. K. (2005). Konya ilinde kavun solgunluk hastalığının yaygınlığı ve izole edilen *Fusarium* türlerinin patojeniteleri. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 19(37), 100-105.
- Carling, D. E., Kuninaga, S., & Brainard, K. A. (2002). Hyphal anastomosis reactions, rDNA-internal transcribed spacer sequences, and virulence levels among subsets of *Rhizoctonia solani* anastomosis group-2 (AG-2) and AG-BI. *Phytopathology*, 92(1), 43-50. doi:10.1094/PHYTO.2002.92.1.43
- Cerkauskas, F. R. (2017). Etiology and management of *Fusarium* crown and root rot (*Fusarium oxysporum*) on greenhouse pepper in Ontario, Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 39(2), 121-132. doi:10.1080/07060661.2017.1321044
- Demir, S., Turkmen, O., Sensoy, S., Akkopru, A., Erdinc, Ç., Yildiz, M., & Kabay, T. (2006). Reactions of melon landraces grown in the Lake Van Basin to the physiologic races (Race 1 and Race 2) of *Fusarium oxysporum f. sp. melonis*. *European Journal of Horticultural Science*, 71(2), 91-95.
- Demirci, E. (1995). Anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* Kuhn and binucleate *Rhizoctonia* isolates from various crops in Türkiye. *Journal of Turkish Phytopathology*, 24(2), 57-62.
- Demirer Durak, E. (2018). Anastomosis groups, pathogenicity and biological control of *Rhizoctonia* species isolated from pepper (*Capsicum annuum L.*) plants in Lake Van Basin. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(6), 4198-4205.
- Demirer Durak, E., & Demirci, E. (2014). Pathogenicity of *Fusarium* species isolated from strawberry plants in Erzurum province. *Plant Protection Bulletin*, 54(3), 247-253.
- Demirer Durak, E., & Demirci, E. (2018). Anastomosis groups and pathogenicity of *Rhizoctonia* species from strawberry plants in Erzurum province, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(6), 4206-4211.
- Demirer Durak, E., & Ok, F. (2019). Determination of anastomosis groups and pathogenicity of *Rhizoctonia solani* kuhn isolates from tomato (*Solanum lycopersicum*) in lake Van basin, Turkey. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(4), 1908-1915. doi:10.21597/jist.571269
- Durak, E. D. (2016). Biological control of *Rhizoctonia solani* on potato by using indigenous *Trichoderma* spp. *AIP Conference Proceedings*, 1726(1), 020020. doi:10.1063/1.4945846
- Duran, İ., & Özkaya, H. Ö. (2016). Kumluca ilçesi sera alanlarında toprak ve yaprak kökenli fungal hastalık etmenlerinin belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1), 111-122.
- Erincik, Ö., Özdemir, Z., & Döken, M. (2017). Urla yarımadasında Çeşme kavununda kurumalara neden olan fungal patojenlerin yaygınlıkları ve bulunma oranları. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 14(2), 57-61. doi:10.25308/aduziraat.317659
- Erzurum, K. (2000). Orta Anadolu Bölgesindeki kavun solgunluk nedenleri üzerinde araştırmalar. *Journal of Agricultural Sciences*, 6(03), 9-12.

- FAO. (2019). FAOSTAT–Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#home> Erişim Tarihi:12.07.2021.
- Gardener, B. B. M., & Fravel, D. R. (2002). Biological control of plant pathogens: research, commercialization, and application in the USA. *Plant Health Progress*, 3(1), 17. doi:10.1094/PHP-2002-0510-01-RV
- Gerlach, W., & Nirenberg, H. (1982), *The Genus Fusarium, a Pictorial Atlas*. Berlin-Dahlem, Germany: Biologische Bundesanstalt Land- und Forstwirtschaft Inst. Mikrobiologie. doi:10.5073/20210624-131350
- Göçmen, M., & Abak, K. (2006). Farklı biber (*Capsicum annuum* L.) genotiplerinin iki değişik *Fusarium solani* L. izolatına karşı dayanıklılık durumlarının belirlenmesi. *Bahçe*, 35(1-2), 1-8.
- Güler Güney, İ., & Güldür, M. E. (2018). Inoculation techniques for assessing pathogenicity of *Rhizoctonia solani*, *Macrophomina phaseolina*, *Fusarium oxysporum* and *Fusarium solani* on pepper seedlings. *Turkish Journal of Agricultural Research*, 5(1), 1-8. doi:10.19159/tutad.310211
- Günay, A. (1993). *Özel Sebze Yetiştiriciliği*. Ankara, Türkiye: A.Ü. Ziraat Fak. Bahçe Bitkileri.
- Ichielevich- Auster, M., Sneh, B., Koltin, Y., & Barash, I. (1985). Pathogenicity, host specificity and anastomosis groups of *Rhizoctonia* spp. isolated from soils in Israel. *Phytoparasitica*, 13, 103-112. doi:10.1007/BF02980887
- Kavroulakis, N., Ehaliotus C., Ntougias S., Zervakis G. I., & Papadopoulou, K. K. (2005). Local and systemic resistance against fungal pathogens of tomato plants elicited by a compost derived from agricultural residues. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 66(5), 163-174. doi:10.1016/j.pmp.2005.06.003
- Kırbağ, S., & Turan, N. (2006). Malatya'da yetiştirilen bazı sebzelerde kök ve kökboğazı çürüklüğüne neden olan fungal etmenler. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 159-164.
- Kronland, W. C., & Stanghellini, M. E. (1988). Clean slide technique for the observation of anastomosis and nuclear condotion of *Rhizoctonia solani*. *Phytopathology*, 78, 820-822.
- Mutlu, G., Kırbağ, S., & Üstüner, T. (2015). Determination of fungal diseases in greenhouse cucumber in Elazığ Province. *Plant Protection Bulletin*, 55(4), 341-360.
- Muyolo, N. G., Lipps, P. E., & Schmitthenner, A. F. (1993). Reactions of dry bean, lima bean, and soybean cultivars to *Rhizoctonia* root and hypocotyl rot and web blight. *Plant Disease*, 77, 234-238.
- Nam, M. H., Park, M. S., Kim, H. G., & Yoo, S. J. (2009). Biological control of strawberry *Fusarium* wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *fragariae* using *Bacillus velezensis* BS87 and RK1 formulation. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 19(5), 520-524.
- Ogoshi, A. (1975). Grouping of *Rhizoctonia solani* Kuhn and their perfect states. *Review of Plant Protection Research*, 8, 93-103.
- Ozan, S., & Maden, S. (2004). Ankara ili domates ekiliş alanlarında solgunluk ve kök ve kökboğazı çürüklüğüne neden olan fungal hastalık etmenleri. *Bitki Koruma Bülteni*, 44(1-4), 105-120.
- Parmeter, J. R. Jr., Sherwood, R. T. & Platt, W. D. (1969). Anastomosis grouping among isolates of *Thanatephorus cucumeris*. *Phytopathology*, 59, 1270-1278.
- Pérez-Hernández, A., Serrano-Alonso, Y., Aguilar-Pérez, M. I., Gómez- Uroz, R., & Gómez Vázquez, J. (2014). Damping-off and root rot of pepper caused by *Fusarium oxysporum* in Almeria province, Spain. *Plant Disease*, 98(8), 1159.
- Shanmugam, V., Ajit, N. S., Raja, R., & Devendra, D. (2009)). Screening carnation and gladiolus cultivars for vascular wilt resistance. *Indian Phytopathology*, 62(1), 117-118.
- Sensoy, S., Ocak, E., Demir, S., & Tufenkci, S. (2013). Effects of humic acid, whey and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) applications on seedling growth and *Fusarium* wilt in zucchini (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Animal and Plant Sciences*, 23(2), 507-513.
- Sharon, M., Freeman, S., Kuninaga, S., & Sneh, B. (2007). Genetic diversity, anastomosis groups and virulence of *Rhizoctonia* spp. from strawberry. *European Journal of Plant Pathology*, 117, 247-265. doi:10.1007/s10658-006-9091-7
- Smiley, R. W., Dernoeden, P. H., & Clarke, B. B. (2005). *Compendium of Turfgrass Diseases* (3<sup>rd</sup> Ed.). Minnesota, USA: American Phytopathological Society (APS Press).

- Sneh, B., Jabaji-Hare, S., Neate, S. M., & Dijst, G. (1996). *Rhizoctonia* Species: Taxonomy, Molecular Biology, Ecology, Pathology and Disease Control. London, UK: Kluwer Academic Publishers.
- Soylu, E. M., Soylu, S., Kara, M., & Kurt, Ş. (2020). Sebzelelerde sorun olan önemli bitki fungal hastalık etmenlerine karşı vermikomposttan izole edilen mikrobiyomların in vitro antagonistik etkilerinin belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 23(1), 7-18. doi:10.18016/ksutarimdogavi.601936
- Tuncer, S., & Eken, C. (2013). Anastomosis grouping of *Rhizoctonia solani* and binucleate *Rhizoctonia* spp. isolated from pepper in Erzincan, Turkey. *Plant Protection Science*, 49(3), 127-131. doi:10.17221/77/2012-PPS
- Yıldırım, E. (2017). *Samsun ili örtüaltı sebze yetiştirilen alanlarda Rhizoctonia Spp.'Ne ait fungusların anastomosis gruplarının, karakteristik özelliklerinin ve patojenitelerinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi), Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Yıldız, A., & Döken, M. T. (2002). Anastomosis group determination of *Rhizoctonia solani* Kün (Teleomorph: *Thanatephorus cucumeris*) isolates from tomatoes grown in Aydın, Turkey and their disease reaction on various tomato cultivars. *Journal of Phytopathology*, 150(10), 526-528.
- Zvirin, T., Herman, R., Brotman, Y., Denisov, Y., Belausov, E., Freeman, S., & Perl-Treves, R. (2010). Differential colonization and defence responses of resistant and susceptible melon lines infected by *Fusarium oxysporum* race 1-2. *Plant Pathology*, 59(3), 576-585. doi:10.1111/j.1365-3059.2009.02225.x



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Mısır Islahında *In Vivo* Dihaploid Teknolojisi ile Saf Hat Geliştirilmesi

Mehmet YILDIRIM<sup>1</sup>, Önder ALBAYRAK<sup>1</sup>, Merve BAYHAN\*<sup>1</sup>, Remzi ÖZKAN<sup>1</sup>, Cuma AKINCI<sup>1</sup>, Ferhat KIZILGEÇİ<sup>2</sup>, Behiye Tuba BIÇER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dicle Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, 21280, Diyarbakır, Türkiye

<sup>2</sup>Artuklu Üniversitesi, Kızıltepe Meslek Yüksekokulu, Tohumculuk Programı, 47060, Mardin, Türkiye

Mehmet YILDIRIM, ORCID No: 0000-0002-6953-4479, Önder ALBAYRAK, ORCID No: 0000-0003-2440-7748, Merve BAYHAN, ORCID No: 0000-0002-3220-4548, Remzi ÖZKAN, ORCID No: 0000-0002-6457-5802, Cuma AKINCI, ORCID No: 0000-0002-3514-1052, Ferhat KIZILGEÇİ, ORCID No: 0000-0002-7884-5463, Behiye Tuba BIÇER, ORCID No: 0000-0001-8357-8470

\*Sorumlu yazar e-posta: mervebayhan21@gmail.com

#### Makale Bilgileri

Geliş: 22.12.2022

Kabul: 09.03.2023

Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1222944

#### Anahtar Kelimeler

Bitki ıslah,  
Haploid,  
Hibrit çeşit,  
İnduser,  
Mısır,  
Yerel çeşit

**Öz:** Klasik mısır ıslahında ıslah süresinin uzun olması, yüksek mali finans ve iş gücü gerektirmesi yeni hibrit çeşit geliştirmede özellikle küçük ve orta ölçekli ıslah kuruluşlarının mısır ıslahı yapmasını güçleştirmektedir. Bu bariyeri kırmak için son yıllarda uygulamaya konan in vivo haploidi tekniği yukarıda sayılan avantajlarının yanısıra seleksiyon etkinliğini artırmakta, tam homozigotluk sağlamakta, moleküler marker tekniklerinin uygulanması için uygun saflık sağlamaktadır. Bu çalışmada induser kullanarak in vivo maternal haploid bitki elde etme yönteminin mısır ıslahında kullanılma potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada kendilenmiş hat elde etmek için Karadeniz Bölgesi yerel mısır popülasyonları ve haploid bitki elde edilmesinde tozlayıcı olarak RWS ve RWK-76 induser (indirgeyici) genotipleri materyal olarak kullanılmıştır. Çalışmanın kromozom katlama, tohum çoğaltımı ve bitki yetiştirme işlemleri Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü laboratuvar, sera ve deneme arazisinde 2016, 2017 ve 2018 yıllarında yürütülmüştür. DH hatlar 3 adet ticari hibrit çeşidiyle melezlenmiş ve bu melezleme sonucunda 9 melezde tekerrürlü deneme kuracak kadar tohum elde edilmiştir. 2018 yılında DH hatlardan elde edilen test melezleri 3 tekerrürlü olarak tesadüf blokları deneme desenine göre ekilerek yetiştirilmiş ve bazı tarımsal özellikler yönünden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre başta tane verimi olmak üzere bitki boyu, ilk koçan yüksekliği, gövde çapı, yaprak eni ve SPAD, koçan ağırlığı, koçan boyu, koçan çapı, koçanda sıra sayısı, koçan sırasında tane sayısı ve uç boşluk uzunluğu, sömek çapı, koçanda tane ağırlığı özellikleri yönünden standart çeşitleri aşan DH melez kombinasyonları saptanmıştır. In vivo haploid bitki elde etme yönteminde başarıyı en çok düşüren aşamanın DH bitkilerin kendilenmesi aşaması olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada mısır ıslahında bir bütün olarak başarıyla kullanılabileceği ortaya konmuştur. Yerel mısır çeşitlerimizin hem bu yöntemin uygulanmasına uygun olduğu hem de ıslahta doğrudan anaç olarak kullanmak için uygun genotipik potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir. DZ-M-13 x Gariz, DZ-M-56 x Elioso, DZ-M-67 x Elioso-1 ve DZ-M-67 x Excel-1 DH melezleri tane verimi bakımından öne çıkan genotipler olmuşlardır. Ayrıca test melezlerinde incelenen özellikler arasında tane verimi ile bitki boyu, ilk koçan yüksekliği, koçanda tane sayısı ve koçan ağırlığı arasında pozitif ve önemli korelasyon ilişkileri saptanmıştır.

## Inbred Line Improvement with Doubled Haploid Technology in Maize Breeding

### Article Info

Received: 22.12.2022  
Accepted: 09.03.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1222944

### Keywords

Haploid,  
Hybrid line,  
Inducer,  
Landrace,  
Maize,  
Plant breeding

**Abstract:** The fact that the length of the breeding period is long, high financial finance, and labor force makes it difficult for small and medium scale breeding institutions to make maize breeding. The in vivo haploid technique introduced in recent years to break this barrier increases the efficiency of selection as well as the above-mentioned advantages, providing full homozygosity and providing appropriate purity for the application of molecular marker techniques. In this study, the potential of inducer used in vivo maternal haploid technique in maize breeding was investigated. In the study, maize landrace populations belonging to the Black Sea region and RWS and RWK-76 inducers were used as the pollinator to obtain inbred lines. Chromosome doubling, seed reproduction, and plant growing operations of the study were carried out in 2016, 2017, and 2018 years in the laboratory, greenhouse, and experiment area of the Dicle University Faculty of Agriculture, Field Crops Department. Of these plants, 274 double-haploid (DH) seeds belonging to 6 genotypes were obtained. DH lines were hybridized with 3 commercial hybrid varieties and enough seed was obtained from 9 hybrids to establish a repeat experiment. In 2018, the test cross hybrids obtained from DH lines were planted in a randomized completed block design with 3 replications and evaluated for some agronomic properties. According to the results, DH hybrid combinations that exceed the standard types were determined for plant height, first ear height, stem diameter, SPAD, ear weight, ear length, ear diameter, number rows per ear, number grains per ear, grain weight per ear traits including grain yield. In this study, it has been shown that in vivo haploid plant obtaining method can be used successfully as a whole in maize breeding. It was determined that Turkish maize landraces were suitable both for the application of this method and for the genotypic potential to be used directly as the inbred line inbreeding. DZ-M-13 x Gariz, DZ-M-56 x Elioso, DZ-M-67 x Elioso-1 and DZ-M-67 x Excel-1 DH hybrids are superior genotypes in terms of grain yield. In addition, positive and significant correlations were found between grain yield and plant height, first ear height, number of grains per ear and ear weight in the test hybrids.

## 1. Giriş

Buğdaygiller (*Poaceae*) familyasının Maydeae oymağına giren mısır bitkisi, beslenme, hayvan yemi ve sanayide ham madde gibi geniş kullanım alanına, aynı zamanda tropik, subtropik ve ılıman iklim kuşakları gibi geniş adaptasyon yeteneğine ve yüksek verime sahip önemli bir bitkidir. Dünya Gıda Örgütü'nün 2019 yılı rakamlarına göre mısır, buğday ve pirinç'ten sonra en fazla ekim alanına sahip bitkidir (FAOSTAT, 2019). Türkiye'de ise ekim ve üretim bakımından mısır bitkisi tahıl bitkileri arasında üçüncü sırada yer almaktadır. Türkiye'de mısır bitkisinin ekim alanı yaklaşık 600 bin hektar, üretimi 5.7 milyon ton ve ortalama verim 963 kg da<sup>-1</sup> olarak belirlenmiştir. Türkiye'de üretilen mısırın %78'i hayvan beslenmesinde yem maddesi olarak, %15'i nişasta sanayinde, %5'i yerel tüketim, %3'ü ise endüstriyel alanda değerlendirilmektedir. Toplam tüketim miktarı 7-7.5 milyon ton arasında değişim göstermektedir (TÜİK, 2019).

İnsan beslenmesi geçmişten bugüne üzerinde önemle durulan konuların başında olmasına rağmen Dünya nüfusunun orantısız bir şekilde artmasıyla insan beslenmesi için mutlak gerekli olan tahıllar ve dolayısıyla mısır bitkisi temel bir besin kaynağı olarak büyük pay edinmiştir. Dünyadaki kullanılabilir tarım alanları sabit olduğundan ve arttırma imkânı olmadığından dolayı arazileri en iyi şekilde değerlendirerek birim alana düşen verimi arttırmak gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu da ancak mısır bitkisinde verim ve kalitenin artırılması, hastalık ve zararlılara karşı dayanıklılığının geliştirilmesi, yeni ve daha geniş adaptasyon yeteneğine sahip olan çeşitlerin genetik yapılarının belirlenmesi ile birlikte çeşitli ıslah yöntemlerinin uygulanması ve geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Klasik bitki ıslahı genetik faktörlerin yanında çevresel koşulların etkisinde olduğundan sonuca ulaşılması zaman almaktadır. Bir çeşidin ıslah edilebilmesi bitki türüne göre değişmekle birlikte



yaklaşık 10 ile 14 yıl sürmektedir. Bitki ıslahçıları bu süreci kısaltmak için yeni teknolojilere ve yöntemlere başvurmuşlardır. Bu sürenin kısaltılmasında haploid bitki elde etme teknikleri önemli avantajlar sağlamaktadır. Mısır ıslahında haploid tekniği ile elde edilen double haploid hatların potansiyeli uzun süre önce ortaya konmuştur (Chase, 1969). Mısır ıslah çalışmalarında haploid bitki elde etme tekniklerinin kullanılmasıyla kısa sürede %100 homozigot hatlar elde edilebilmektedir. Bu tekniğin kullanılmasıyla ıslah çalışmalarının süreci kısaltmakta, hızlı ve güvenilir bir şekilde etkinliği artmaktadır. Ayrıca sonuca çok daha kısa ve etkin bir şekilde ulaşılmasıyla maliyetin düşürülmesi açısından da önemli avantajlar sağlanabilmektedir.

Mısır'daki DH (doubled haploid) hatların eldesi, in vitro veya in vivo yöntemler kullanılarak çeşitli kurumlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Ancak in vitro yöntemler, iyi bir laboratuvar, yüksek maliyet, vasıflı personel gerektirmesinin yanı sıra, mısır genotiplerinin in vitroya pek çoğunun yanıt vermemesi veya düşük oranda tepki vermesi nedeniyle kullanımı çok sınırlı kalmıştır. Buna karşılık, mısır genetikçilerinin “haploid inducer genetik stok”larını tanımlamadaki çabaları sayesinde mısırdaki in vivo haploid indüksiyon bazlı DH hat gelişimi nispeten daha kolaydır (Coe & Sarkar, 1964). Ayrıca hem tohum hem de fide aşamalarında haploidlerin zahmetsiz teşhisini kolaylaştırmak için indükleyici genetik materyale ait bir antosiyanın renk markörü kullanılmaktadır (Nanda & Chase, 1966; Greenblatt & Bock, 1967). In vivo haploid indüksiyonuna dayanan mısır yetiştiriciliğinde DH teknolojisi, dünya çapında, ıslah verimliliğini arttırmak için önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. Son 10-15 yılda Avrupa'da (Kuzey Amerika) (Seitz, 2005) ve daha yakın zamanlarda Çin'de (Chen ve ark., 2009) haploid indükleyici hatların ılıman ortamlarda kullanılabilir hale gelmesiyle bu teknoloji bazı ticari mısır yetiştirme programları tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır (Prigge & Melchinger, 2011).

Bu çalışmada mısır bitkisinde kendilenme süresini ciddi oranda düşüren in vivo dihaploid yöntemi kullanılmış ve araştırma sonunda kendilenmiş hat elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada bu kendilenmiş hatlar test melezleri ile melezlenip, hibrit mısır ıslahında anaç olarak kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Bu yolla hibrit F1 bitkilerinin elde edilmesinde kullanılacak anaçların hem çok kısa sürede hem de daha az işgücü ve masrafla kendilenmiş hatta dönüştürülmesi ve bunlardan hibrit elde edilebilirliği belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma 2015-2018 yılları arasında gerçekleşen 4 yıllık çalışma süresini kapsamaktadır. Araştırma Sakarya Mısır Araştırma Enstitüsünde ve Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümüne ait deneme alanı, kontrollü sera koşulları ve tam otomatik çimlendirme kabini olmak üzere 3 farklı ortamda yürütülmüştür.

Birinci yıl (2015): çalışmada kullanılacak genotipler Sakarya Mısır Araştırma Enstitüsünde inducer hatlarla haploid tohum elde etmek amacıyla melezlenmiş ve yıl sonunda melezlenen yerel genotiplerde tanedeki markör özelliklerine göre haploid tohumlar seçilmiştir.

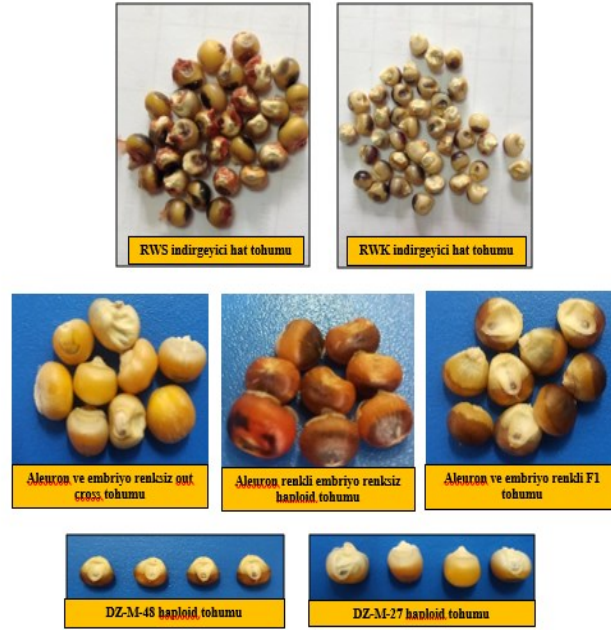
İkinci yıl (2016): Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi'nde haploid tohumlar çimlendirilmiş ve kolşisinle muamele edilerek kromozom katlaması yapılmıştır. Bu bitkiler kendilenerek dihaploid tohumlar elde edilmiştir.

Üçüncü yıl (2017): Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi Araştırma ve Uygulama Alanında kendilenmiş hatlar standart çeşitlerle birlikte tarla denemesinde ekilerek melezleme işlemi yapılmış ve double haploid hibrit tohumlar elde edilmiştir.

Dördüncü yıl (2018); Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi Araştırma ve Uygulama Alanında double haploid hibrit tohumlar tarla denemesinde tekerrürlü ekilerek genotiplerin hibrit performansları test edilmiştir.

### 2.1. Materyal

Mısır bitkilerinde dihaploidliği sağlayan inducer hatlar Cimmyt'in (Uluslararası Buğday ve Mısır Geliştirme Merkezi) 'Global Maize Program' birimi tarafından geliştirilmiştir. Bu kapsamda araştırmada kullanılan ılıman inducer hatları; RWK-76 (WS14xKEMS induserlerinden resiprokal melezleme ile geliştirilmiş) ve RWS (Rusya induceri)'dir (Şekil 1).



Şekil 1. İndirgeyici hatlar ve haploid tohumların genel görünüşü (RWK-RWS İndirgeyici hatlar-Yorgancılar ve ark., 2019).

Kendilenmiş hat elde edilmesinde ana olarak kullanılmış bitkiler Karadeniz bölgesinden toplanan yerel mısır populasyonlarından oluşmuştur. Bu populasyonlara ait bilgiler Çizelge 1’de verilmiştir. Ayrıca test melezlemelerinde ve yerel mısırların morfolojik ve fizyolojik özelliklerinin incelendiği denemelerde DNA Tohumluk firmasına ait Gariz, Exel ve Elioso hibrit mısır çeşitleri kullanılmıştır.

Çizelge 1. Araştırmada induser hatlar ile melezlemede kullanılan yerel mısır genotiplerinin isimleri ve toplandıkları yerler

Hat Kodu	İl-İlçe-Mahalle	Kütük No	İl-İlçe-Mahalle
DZ-M-2	Rize-Çayeli-Çınar Tepe	DZ-M-54	Rize-Ardeşen-Seslikaya
DZ-M-3	Rize-Çayeli-Sefalı	DZ-M-56	Trabzon-Çaykara
DZ-M-6	Trabzon-Akçaabat-Dörtyol	DZ-M-57	Trabzon-Çaykara
DZ-M-7	Trabzon-Akçaabat-Dörtyol	DZ-M-59	Artvin-Arhavi-Lome-Kavak
DZ-M-8	Trabzon-Akçaabat-Dörtyol	DZ-M-60	Rize-Fındıklı-Sümer
DZ-M-13	Rize-Fındıklı-Ihlamurlu	DZ-M-63	Artvin-Borçka-Çat-Düzköy
DZ-M-14	Rize-Fındıklı-Yeniköy	DZ-M-67	Artvin-Borçka-Çat-Düzköy
DZ-M-17	Trabzon-Of-Yenimahalle	DZ-M-68	Artvin-Hopa-Çamurlu
DZ-M-24	Rize-Fındıklı-Sulak	DZ-M-69	Artvin-Merkez
DZ-M-25	Rize-Çayeli-Hayde-Beşikçiler	DZ-M-70	Artvin-Merkez
DZ-M-27	Rize-Fındıklı-Gültepe-Sulak	DZ-M-71	Karabük-Eskipazar-Ova
DZ-M-28	Rize-Merkez-Emekçiler	DZ-M-72	Giresun-Merkez
DZ-M-29	Artvin-Arhavi-Zeytinlik-Güngören	DZ-M-74	Ordu-Fatsa-Ilıca
DZ-M-30	Rize-Güneysu-Ortaköy	DZ-M-75	Samsun-Merkez
DZ-M-31	Rize-Güneysu-Ortaköy	DZ-M-76	Giresun-Görece-Hürriyet
DZ-M-34	Trabzon-Merkez	DZ-M-78	Tokat-Erbaa
DZ-M-36	Rize-Merkez-Ali Paşa	DZ-M-89	Ordu-Fatsa-Yukarı Mah.
DZ-M-37	Rize-Hemşin-Hilal	DZ-M-94	Ordu-Fatsa-Ilıcakavaklar
DZ-M-39	Rize-Güneysu-Ortaköy	DZ-M-96	Karabük-Ovacuma

Çizelge 1. Araştırmada inducer hatlar ile melezlemede kullanılan yerel mısır genotiplerinin isimleri ve toplandıkları yerler (devam)

Hat Kodu	İl-İlçe-Mahalle	Kütük No	İl-İlçe-Mahalle
DZ-M-41	Artvin-Arhavi-Zeytinlik-Güngören	DZ-M-99	Samsun-Merkez-Sarayköy
DZ-M-42	Artvin-Borçka-Caniti-Düzköy	DZ-M-100	Ordu-Fatsa-Ilıca
DZ-M-45	Artvin-Hopa-Madenli-Çamlı köy	DZ-M-104	Samsun-Tekkeköy
DZ-M-46	Artvin-Arhavi-Zeytinlik-Güngören	DZ-M-107	Sinop-Gerze-Bolalı
DZ-M-48	Rize-Ardeşen-Kurtuluş	DZ-M-110	Amasya-Merkez-Kovabayır
DZ-M-49	Rize-Ardeşen-Kurtuluş	DZ-M-124	Çorum-Laçın-Gökgözler

## 2.2. Yöntem

### İnduser hatlar ile yerel mısır genotiplerinin melezlenmesi ve haploid tohum eldesi

Toplam 50 adet yerel mısır genotipinin inducer hatlar ile melezlenmesi Sakarya Mısır Araştırma Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir. Kaynak populasyonları tek sıra halinde 20 cm sıra üzeri mesafe ile 5 m uzunluğundaki sıralara ekilmiştir. Benzer şekilde inducer hatlar da iki sıra kaynak populasyonu ve bir sıra inducer olacak şekilde yan yana ekilmiştir. Her iki sıra arasında 70 cm mesafe bırakılmıştır. Çalışmada hem yeteri kadar inducer tozu elde etmek hem de melezleme zamanlarını denk getirmek amacıyla ekim işlemi 20 gün arayla iki kez daha yapılarak toplamda 3 defa tekrarlanmıştır.

Ağustos ayı içerisinde inducer hatlar ile mevcut genotipler melezlenmiştir. Kaynak populasyonları ana, inducer hatlar ise baba olarak kullanılmıştır. Ana sıralarında tepe püskülü çıkıştan hemen sonra elle çekilerek kopartılmış ve koçan püskülü çıkmadan koçanlar önce izolasyon zarfı ile kapatılarak yabancı tozlanma önlenmiştir. Baba sıralarında tepe püskülü toz verir duruma geldiğinde tozlama işlemi yapılmış ve tekrar izolasyon zarfı ile kapatılmıştır. Her populasyon için en az 10 melezleme yapıp, melezleme sonucunda yeterli sayıda melez tohum elde edilmiştir. Elle hasat edilen koçanlar yine elle harman edilmiş ve elde edilen tohumların içerisinde embriyosu mor renkli olup endospermi ananın orijinal renginde olan tohumlar ayıklanmıştır. Bu amaçla 50 genotipin 45'inden haploid tohum başarıyla elde edilmiştir. Haploid bitkileri verecek melez tohumlar kendileme denemesi kurulana kadar 4°C de buzdolabında muhafaza edilmiştir.

### Haploid tohumlarda kromozom katlaması

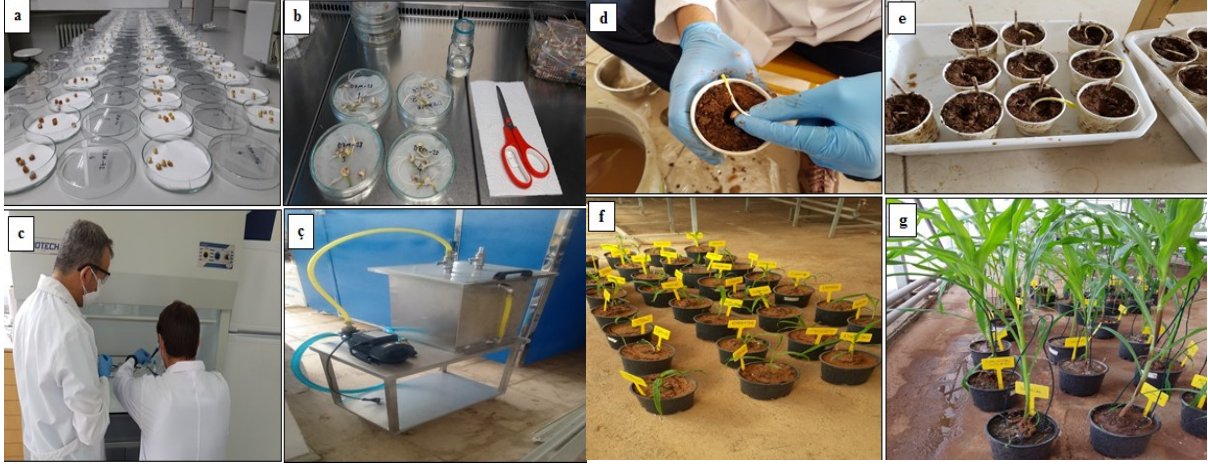
Çalışmanın ikinci yılında daha önceki dönemde inducerle melezlenmiş ve tanedeki markör özelliklerine göre haploid olan tohumlarda kolşisin ile kromozom katlaması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla haploid hale getirilmiş 45 genotipten yeteri kadar tohuma sahip olan 42 genotip çimlendirmeye alınmıştır.

Çimlendirme denemesinde 9 cm çapında cam petri kaplarına iki kat kurutma kâğıdı koyulmuş ve her petriye 5 tohum gelecek şekilde (her genotip için bir petri kabı) hazırlanmıştır. Tohumlar tam otomatik çimlendirme kabinde ortam değerleri 27 °C sıcaklık %50 nem olacak şekilde 72 saat çimlendirmeye bırakılmıştır. Çimlendirmeye bırakılan 210 tohumdan 139'u çimlenmiştir. Çimlenen bu bitkiciklere kolşisin uygulaması yapılarak kromozom katlama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2. a-b).

Kolşisin uygulaması için, Sigma Aldrich firmasına ait Colchisin'den %0,04 çözelti hazırlanmış ve bu çözeltiye mutajenin bitkiciklere nüfuzunu kolaylaştırması için %0.5 ml DMSO eklenmiştir. Bu işlemlerin hepsi laboratuvar şartlarında çeker ocak içerisinde her türlü bulaşmaya karşı korumalı bir şekilde yürütülmüştür (Şekil 2. c-ç)

Kolşisin uygulamak için bitkiciklerin çim kını uçlarından 1 cm ve kökçüklerin uçlarından 2 cm bisti ile kesilmiştir. Daha sonra bu bitkicikler kolşisin çözeltisine koyularak 24 saat bekletilmiş ve 24 saat sonunda bitkiciklere saf suyla durulama işlemi yapılmıştır.

Kolşisin uygulanan bitkicikler, 1/1/1 oranlarında kum/toprak/torf karışımı olan küçük saksılara dikilerek, 27 °C sıcaklık, %50 nem ve 10/14 saat ışık olacak şekilde ayarlanan tam otomasyonlu bitki yetiştirme kabinde 10 gün süre ile tutulmuştur (Şekil 2. d-e).



Şekil 2. a: Kolşisin işleminde çimlendirme aşaması için hazırlanan haploid tohumlar, b: Kolşisin işlemi uygulanan çimlenmiş haploid tohumlar, c-ç: Kolşisin işleminin uygulanması için genotiplerin hazırlandığı steril ortam, d-e: Kolşisin işleminden sonra bitki yetiştirme kabineine alınan genotipler f-g: Dihaploid hale gelen bitkilerin serada yetiştirilmesi.

### Dihaploid hale gelmiş bitkilerin kendilenmesi

Bitki büyüme odasından 10 günün sonunda hayatta kalan 80 bitki yarı kontrollü serada daha büyük saksılara şaşırtılmıştır. Büyük saksılara aktarılan bitkilere 20-20-0 kompoze gübreden verilmiş ve düzenli bir şekilde sulamaları yapılmıştır. Büyük saksılara şaşırtma işleminden 10 gün sonra bitkilere yatmalarını engellemek için kök boğazı doldurma ve kazıkla destekleme yapılmıştır. Saksılar gün aşırı sulanarak bitkilerin büyümesi sağlanmıştır. Ancak şaşırtma sonucunda 80 bitkiden 10 tanesi ölmüş ve 70 bitki büyümeye devam etmiştir.

Çalışma planına göre kromozom katlaması yapılmış olan dihaploid bitkilerin hem serada hem de tarlada yetiştirilip kendilenmesi düşünülmüştür. Ancak iki yıllık tarla gözlemlerine göre hem yerel genotiplerde hemde hibrit çeşitlerde çoğunlukla koçan püskülünün tepe püskülünden çok geç çıkması kendilemede sorunlara neden olmuş ve bu durum zaten hassas ve kırılğan olan Dihaploid bitkilerin tarla yetiştirilme aşamasının iptal edilmesine neden olmuştur. Bu sebeple Dihaploid bitkiler sıcaklık kontrolü olan seraya aktararak büyümeye alınmıştır (Şekil 2. f-g).

Sera şartlarında bitkilerde kendileme işlemi yapılarak saflaştırma ve tohum çoğaltımı gerçekleştirilmiştir. Bitkilerin kendileme işleminde tepe püskülü ve koçan püsküllerinin çıkışlarında zamanlama açısından uyumsuzluklar yaşanmıştır. Bu yüzden tepe püsküllerinden alınan çiçek tozları -20°C'de tepe püskülü çıkış tarihine kadar muhafaza edilip bu sorun giderilmiştir. Bitkilerin tozlanma dönemi Ocak-Şubat aylarına ve hasat tarihleri ise Nisan ayına denk gelmiştir. Harmanlanan tohumlar etiketlenip, cam şişelerde muhafaza altına alınmıştır. Kendilme yapılması planlanan bitkilerin yaklaşık olarak dörtte biri zayıf gelişme ve steril kalma nedeniyle denemeden çıkarılmıştır. Geriye kalan bitkilerin ise yarısında döllenme meydana gelmiş ve kendilemeye alınan bitkilerin ancak %40'ında tohum alınabilmiştir (Şekil 3. h-ı).

### Kendilenmiş Dihaploid hatlarda test melezlemesi ve kendileme işlemi

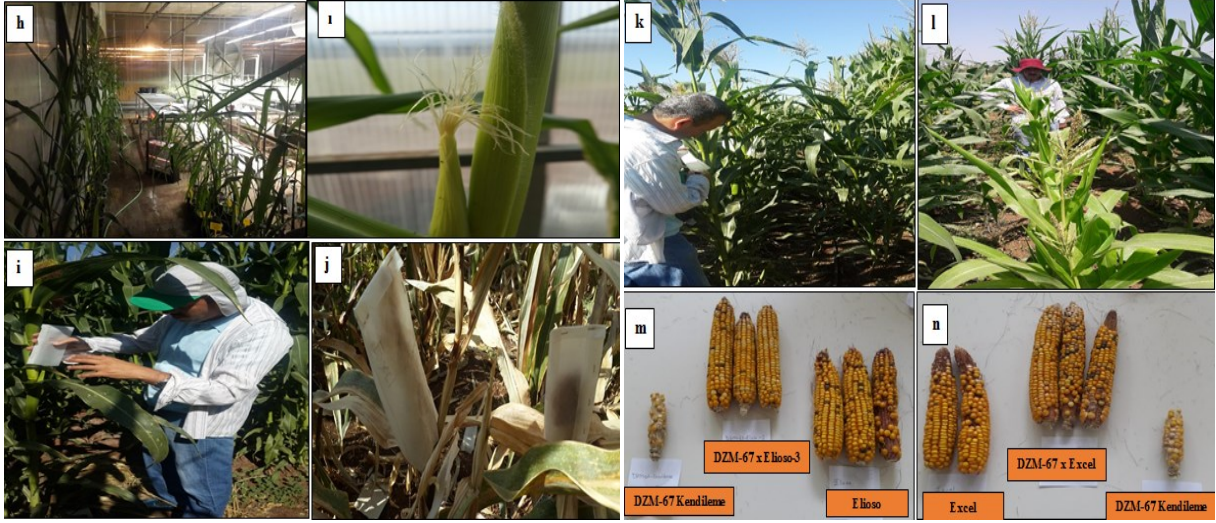
2017 yılında daha önceki dönemde kendilenmiş ve saf hale gelmiş yerel mısır genotiplerinde hem test melezlemesi yapmak hemde kendilemeyi devam ettirmek amacıyla yaklaşık olarak 240 bitki sağlıklı bir şekilde tarla koşullarında yetiştirilerek ekilen tohumlarda %80 oranında çıkış sağlanmıştır. Tüm genotiplerde ticari hibrit çeşitlerle melezleme yapılmış ve denemede test melezlemesinde DNA tohumculuk firmasına ait Gariz, Exel ve Eliso çeşitleri kullanılmıştır.

Yerel çeşitlerden elde edilmiş kendilenmiş hatlar tozlanma döneminde hibrit çeşitlerle melezlenmiş ve F1 bitkilerini verecek olan melez tohumlar elde edilmiştir. Ayrıca melezlemede kullanılan kendilenmiş hatların devamlılığını sağlamak için bir taraftan da kendileme işlemine devam edilmiştir. Melezleme sonucunda bazı koçanlarda tane tutmama olmakla beraber 70 adet melez koçan elde edilmiştir (Şekil 3. i-j).

11 Ekim 2017 tarihinde koçanlar hasat edilmiş ve harmanlama aşamasına geçilmiştir. Harmanlanmadan önce tohumlarda endosperm ve embriyo renk yönünden incelenmiş ve anormallikler



belirlenmiştir. Test melezlemede elde edilen F1 tohumlarının tarla koşullarında performanslarının belirlenebilmesi için bir sonraki yetiştirme sezonuna kadar tohumlar muhafaza edilmiştir.



Şekil 3. h-i: Serada yetiştirilen dihaploid bitkilerin kendileme işlemi, i-j-k: Kendilenmiş dihaploid hatların tarla koşullarında test melezlemesi ve kendileme işleminin devam ettirilmesi, l-m-n: Test melezlerinin tarla koşullarında ekilmesi ve performanslarının değerlendirilmesi.

### Test melezlerinin tarla koşullarında ekilmesi ve performanslarının değerlendirilmesi

Bir önceki sezonda elde edilen kontrol melezleri melezlemede kullanılan standart hibrit çeşitler olan Gariz, Excell ve Elioso ile birlikte tesadüf blokları deneme desenine göre 3 tekrarlamalı olarak ekilmiştir. Ekim işlemi 13.04.2018 tarihinde 2.5 m'lik sıralara deneme mibzeri ile 70 cm sıra arası olacak şekilde yapılmıştır. Ekim ile birlikte dekara 10 kg saf azot gelecek şekilde 20-20-0 kompoze gübresi verilmiştir.

Ekimden hemen sonra sulama ve fertigasyon amacıyla damlama sulama sistemi kurulmuştur. Her iki sıraya bir lateral gelecek şekilde kurulan sulama sistemiyle hem sudan tasarruf edilmiş hem de bitkilerin ihtiyacı olan su bitki kök bölgesine gübre ile birlikte verilmiştir. Sulama işlemleri ile birlikte 15 kg da<sup>-1</sup> saf N olacak şekilde 5 eşit parçaya üre formunda üst gübreleme yapılmıştır. Deneme süresince toplamda 574 mm su, damlama sulama sistemi ile verilmiştir. Denemede yabancı ot kontrolü için elle mücadelenin yanında Foramsulfuron etken maddeli yabancı ot ilacı ile iki defa ilaçlama yapılmıştır.

Ekim işleminden sonra gelişen hibrit bitkilerde ve kontrol çeşitlerinde hem bitkisel özellikler hem de verime dayalı özellikler ölçülmüştür. Bu amaçla hasat öncesi, bitki boyu, ilk koçan yüksekliği, gövde çapı, yaprak eni ve SPAD değerleri alınmıştır. Hasatta bitkilerdeki tüm koçanlar el ile toplanmıştır. Hasat sonrası elde edilen tüm koçanlarda koçan ağırlığı, koçan boyu, koçan çapı, koçanda sıra sayısı, koçan sırasında tane sayısı ve uç boşluk uzunluğu alınmıştır. Harman işlemi tek koçan harman makinası ile yapılmıştır. Harman sonrası sömek çapı ve elde edilen tohumların tartımı ile koçanda tane ağırlığı ve tane verimi değerleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler Jmp istatistik paket programı ile analiz edilmiştir (Şekil 3. k-l-m-n).

Çizelge 2. Araştırma yılına ve uzun yıllara ait iklim verileri

Aylar	Toplam Yağış (mm)		Ortalama Sıcaklık (°C)	
	2018	Uzun Yıllar	2018	Uzun Yıllar
Nisan	48.8	68.5	15.9	13.8
Mayıs	157.8	43.8	19.4	19.2
Haziran	14.4	8.2	26.5	26.1
Temmuz	0	0.7	31.2	31.1
Ağustos	0.8	0.4	31.5	30.4
Eylül	4.15	3.9	31.2	24.8
<b>Toplam/Ortalama</b>	<b>225.95</b>	<b>125.5</b>	<b>25.95</b>	<b>24.23</b>



Test melezlerinin tarla koşullarında denendiği 2018 yılına ait toplam yağış miktarı 225.95 mm ile 125.5 mm olan uzun yıllara ait toplam yağış miktarının üzerindedir (Çizelge 2). Toplam yağış miktarının aylara göre dağılımı incelendiğinde, en fazla yağışın Mayıs ayında olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde, denemenin yürütüldüğü 2018 yılında sıcaklık değerlerinin uzun yıllar ortalamasının üzerinde olduğu ve en yüksek sıcaklık değerlerinin Temmuz ve Ağustos aylarında yaşandığı belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 3. Deneme alanına ait toprak analiz sonuçları

Analiz Adı	Değerler	Nitelik
Saturasyon (%)	: 63.20	Killi Tınlı
Tuzluluk (Saturasyon Çamuru) (dS/m)	: 1.03	Tuzsuz
% Tuz (Hesaplama ile) TS 8334	: 0.042	Tuzsuz
pH (Saturasyon Çamuru)	: 8.15	Hafif Alkali
Kireç (Kalsimetrik) (%)	: 10.59	Orta
Organik Madde (Walkley Black) (%)	: 0.77	Düşük
Azot (Hesaplama ile) (%)	: 0.04	Düşük
Fosfor (Olsen Spektrometre)(ppm)	: 6.00	Düşük
Potasyum (A. Asetat-ICP) (ppm)	: 493.26	Çok Yüksek
Kalsiyum (A. Asetat-ICP) (ppm)	: 10.693.12	Çok Yüksek
Magnezyum (A. Asetat-ICP) (ppm)	: 616.32	Orta
Sodyum (A. Asetat-ICP) (ppm)	: 14.37	Düşük
Demir (DTPA-ICP) (ppm)	: 8.86	Çok Yüksek
Bakır (DTPA-ICP) (ppm)	: 1.72	Orta
Mangan (DTPA-ICP) (ppm)	: 23.10	Orta
Çinko (DTPA-ICP) (ppm)	: 0.29	Düşük

Deneme alanından alınan toprak örneklerine ait bazı fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3'te gösterilmiştir. Deneme alanı toprağı pH değeri 8.15 ile hafif alkalili, tuz içeriğı düşük, orta derecede kireçli ve organik maddece fakir olduğu görülmektedir. Ayrıca çalışmanın yürütüldüğü alan azot ve fosfor bakımından fakir, potasyum bakımından ise zengin içeriğe sahiptir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Haploid bitki elde etme yönünden başarı değerleri

Bu çalışmada in vivo maternal haploid tekniğı kullanılmış, bu nedenle induserler baba (tozlayıcı) bitki yapılmıştır. Ana bitki olarak genetik olarak farklı olan 50 yerel mısır popülasyonu kullanılmıştır (Çizelge 4).

İnducerlerle yapılan melezlemede 50 genotipin 46'sından haploid tohum elde edilmiştir. Dolayısıyla yerel genotiplerin haploid tohum elde etme yanıtı %92 olmuştur. Bu durum bazı genotiplerde inducerlerle uyumsuzluk olduğunun göstergesi olabilir. Melezlemeye olumlu yanıt veren genotiplerde, elde edilen haploid tohum sayısı 10-251 arasında değişmiştir.

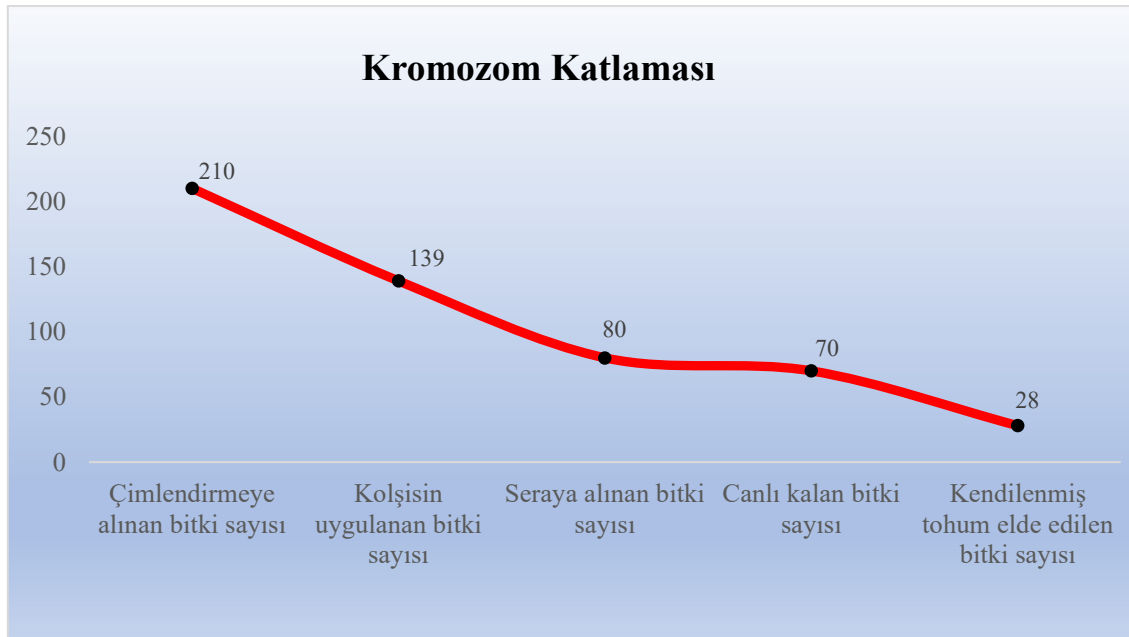
Renk markörüne göre yapılan seleksiyona göre en yüksek haploid tohum sayısı DZ-M-60 hattında (251 tohum) elde edilirken, DZ-M-54, DZ-M-89, DZ-M-94 ve DZ-M-124 hatlarından haploid tohum elde edilmemiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda haploid tohum oranını [Dang ve ark. \(2011\)](#) %15.7 ile %15.0; [Cerit ve ark. \(2016\)](#) RWK-76 induser hattında %1.28 ile %7.80; [Zararsız ve ark. \(2019\)](#) %7.1 ile %12.8; [Cengiz & Korkut \(2020\)](#) %17.75 ile %20.42; [Almeida ve ark. \(2020\)](#) ise %0.61 ile %20.74 arasında saptamışlardır.

Kolşisin katlaması amacıyla her genotipten 5 adet olmak üzere 42 genotipe ait haploid 210 tohum çimlendirmeye alınmış ve kromozom katlaması yapılmıştır (Şekil 4). Kromozom katlaması sonucunda 70 adet bitki canlı kalabilmiştir. Bu bitkilerden steril ve döllenebilir olmaya uygun olmayanlar haricindeki fertil bitkilerde kendileme yapılmış ve 6 genotipte katlanmış Dihaploid tohum elde edilmiştir. Bu genotipler test melezlemesi yapmak amacıyla tarla koşullarında ekilmiş, yapılan melezleme sonucunda 9 melez kombinasyonunda tekerrürlü deneme kuracak kadar tohum elde edilmiştir.

Haploid bitkilerden kromozom katlanması ile %100 homozigot saf hat elde edilebilmektedir. Haploid tekniği, mutasyon ıslahı, melez ıslahı ve genetik transformasyon gibi ıslah teknikleri ile birlikte kullanılarak verim alınabilir (Soydemir ve ark., 2021).

Çizelge 4. Çalışmada kullanılan yerel hatlara ait haploid tohum sayısı, diploid bitki ve diploid tohum elde edilen genotipler

Sıra No	Hat No	Haploid Tohum Sayısı	Diploid Bitki Elde Edilen Genotipler	Diploid Tohum Elde Edilen Genotipler	Sıra No	Kütük No	Haploid Tohum Sayısı	Diploid Bitki Elde Edilen Genotipler	Diploid Tohum Elde Edilen Genotipler
1	DZ-M-2	59	+	-	26	DZ-M-54	0	-	-
2	DZ-M-3	25	+	-	27	DZ-M-56	37	+	-
3	DZ-M-6	98	+	-	28	DZ-M-57	31	+	-
4	DZ-M-7	108	+	-	29	DZ-M-59	168	+	+
5	DZ-M-8	123	+	-	30	DZ-M-60	251	+	-
6	DZ-M-13	25	+	+	31	DZ-M-63	13	+	-
7	DZ-M-14	38	+	-	32	DZ-M-67	38	+	+
8	DZ-M-17	5	-	-	33	DZ-M-68	27	-	-
9	DZ-M-24	5	-	-	34	DZ-M-69	42	+	-
10	DZ-M-25	60	+	-	35	DZ-M-70	45	+	-
11	DZ-M-27	30	+	-	36	DZ-M-71	5	-	-
12	DZ-M-28	45	+	+	37	DZ-M-72	118	+	-
13	DZ-M-29	47	+	-	38	DZ-M-74	10	-	-
14	DZ-M-30	55	+	+	39	DZ-M-75	74	+	-
15	DZ-M-31	35	-	-	40	DZ-M-76	18	+	-
16	DZ-M-34	46	+	-	41	DZ-M-78	115	+	-
17	DZ-M-36	66	+	-	42	DZ-M-89	0	-	-
18	DZ-M-37	25	+	+	43	DZ-M-94	0	-	-
19	DZ-M-39	62	+	-	44	DZ-M-96	79	-	-
20	DZ-M-41	46	-	-	45	DZ-M-99	42	+	-
21	DZ-M-42	54	+	-	46	DZ-M-100	52	+	-
22	DZ-M-45	176	+	-	47	DZ-M-104	37	+	-
23	DZ-M-46	124	+	-	48	DZ-M-107	32	+	-
24	DZ-M-48	111	-	-	49	DZ-M-110	5	-	-
25	DZ-M-49	236	+	-	50	DZ-M-124	0	-	-
<b>Toplam</b>		<b>2943</b>	<b>36</b>	<b>6</b>					



Şekil 4. Haploid bitkilerde kromozom katlaması sonucu elde edilen bitki sayısı.

### 3.2. DH test melezlerinin agronomik ve morfolojik performansları

**SPAD değeri:** SPAD değeri yaprakta klorofil miktarının genel göstergesi olup, yüksek değerler sağlıklı bitki ve yüksek fotosentez potansiyelini temsil etmektedir (Albayrak, 2019). Yapılan varyans analizi sonuçlarına göre genotipler arasında SPAD değeri yönünden bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Bu sonuç test melezlerinde SPAD değerlerinin benzer seviyede olduğunu ve standart çeşitlerdeki gibi istenilen seviyede olduğunu göstermektedir (Çizelge 5). Daha önce yapılan çalışmalarda SPAD değerini Erdal (2014) 38.8-47.3; Topal (2016) 56.07-68.47; Alp & Kahraman (2017) ana ürün mısırda 48.5-56.4, ikinci üründe ise 53.8-59.8 arasında değerler saptamışlardır. Çalışmamızda kullanılan DH melezlerinin SPAD değerlerinin genel olarak standart çeşitlerden yüksek olması verim ve kuru madde üretme potansiyellerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

**Bitki boyu:** Varyans analizi sonuçlarına göre genotipler arasında bitki boyu bakımından önemli farklılık ortaya çıkmıştır. Bu sonuç test melezlerinde ilk koçan yüksekliğinin farklı dağılım gösterdiğini ve standart çeşitlerin altında ve üstünde arzu edilmeyen veya ulaşılması hedeflenen ekstrem değerlere sahip bireylerin bulunabileceğini göstermektedir (Çizelge 5). Melezlerde elde ettiğimiz sonuçlar bitki boyunun tane mısırı yetiştiriciliği yönünden bölge koşulları için uygun olduğunu, DZ-M-56 x Elioso ve DZ-M-67 x Excel-1 melezlerinin silajlık olarak kullanılma potansiyellerinin olduğunu göstermektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda bitki boyunu Karaşahin & Sade (2011) 261.87-263.77 cm ve Öner (2011) 102-394 cm arasında değiştiğini bildirmiştir.

**Yaprak eni:** Varyans analizi sonuçlarına göre genotipler arasında bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Bu sonuç test melezlerinde yaprak eni değerlerinin benzer seviyede olduğunu göstermektedir. Genotiplere ait yaprak eni değerleri 7.46 cm ile 8.99 cm arasında değişmiş, maksimum ve minimum değere sahip genotipler arasında 1.53 cm'lik bir fark oluşmuştur (Çizelge 5). Daha önce yapılan çalışmalarda yaprak eni değerini Albayrak (2019) yürüttüğü iki yıllık çalışmasında birinci yıl 7.42-10.10 cm arasında, ikinci yıl ise 7.45-9.95 cm arasında değiştiğini; Yozgatlı ve ark. (2019) 8.46-9.70 cm arasında değiştiğini bildirmişlerdir.

**İlk koçan yüksekliği:** Mısır bitkisinde koçanların tüm bitkilerde aynı yükseklikte bulunması, hasadı kolaylaştırarak ve ürün kaybını minimuma düşürmektedir. Çalışmada ilk koçan yüksekliği bakımından genotipler arasında önemli bir farklılık ortaya çıkmamış ve test melezlerinde bu değer benzer seviyede olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 5). Daha önce yapılan çalışmalarda ilk koçan yüksekliğini Erdal (2014) 68.2-77.5 cm; Öner (2017) 12-195 cm; Albayrak (2019) yürüttüğü iki yıllık çalışmasında birinci yıl 57.07-144.27 cm arasında, ikinci yıl ise 65.67-180.93 cm arasında değiştiğini bildirmiştir. Makinalı hasada uygunluk bakımından ilk koçan yüksekliğinin fazla olmaması istenmekte ve bu durum göz önüne alındığında elde edilen melezlerin ilk koçan yüksekliği değişim sınırlarının uygun olduğu görülmektedir. Araştırmada ilk koçan yüksekliği yönünden en yüksek değere sahip olan DZ-M-67 x Excel-1 melezinin silajlık olarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

**Gövde çapı:** Mısır üretiminde, özellikle yatmaya dayanıklı sağlam ve kalın gövdeli mısır çeşitleri tercih edilmektedir. Sağlam ve kalın gövdeye sahip çeşitler yatma eğilimi göstermemekte bu da hasatta kolaylık ve tane kayıplarının önüne geçmektedir (Kırtok, 1998). Varyans analizi sonuçlarına göre genotipler arasında gövde çapı değeri bakımından önemli farklılık ortaya çıkmıştır. Bu sonuç test melezlerinde gövde çapının farklı dağılım gösterdiğini ve standart çeşitlerin altında yatma sorunu yaşayabilecek ve çok kalın yatmaya dayanıklı ekstrem değerlere sahip bireylerin bulunabileceğini göstermektedir (Çizelge 5). Daha önce yapılan çalışmalarda gövde çapını Kırnak ve ark. (2003) 22.2-29.5 mm; Kuşçu & Demir (2012) ortalama gövde çapını 25.2 mm olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmamızda gövde çapı değeri literatür bildirimlerine göre daha düşük bulunmuştur. Bununla birlikte 3 test melezinde gövde çapı değeri standart çeşitlerden daha yüksek bulunmuştur.

**Bitkide koçan sayısı:** Varyans analizi sonuçları bitkide koçan sayısının farklı dağılım gösterdiğini ve ekstrem değerlere sahip bireylerin bulunabileceğini göstermektedir (Çizelge 5). Yapılan çalışmalarda bitkide koçan sayısını Kuşvuran ve ark. (2015)'nin silajlık mısır çeşitlerinde 1.2-1.9 koçan/bitki; Topal (2016), atdişi mısırda 1.75-2.50 arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Bitkide koçan sayısının birden fazla olması tane veriminde istenmeyen bir özellik olmasına karşın, silajlık tiplerde avantaja sahip olabilir (Albayrak, 2019).

**Koçan boyu:** Genelde yüksek verime sahip çeşitlerin koçan boyu ve koçan çapı değerleri de yüksek olduğunu bildirmişlerdir (Tekkanat & Soylu, 2005). Ayrıca genotip ve çevre interaksyonunun koçan boyu üzerine önemli bir etkisinin bulunduğu bildirilmiştir (Özmen, 2008). Yapılan çalışmalarda

koçan boyu değerinin, Erdal (2014) 15.2-17.1 cm; İdikut ve ark. (2015) 12.93-17.50 cm; Sabancı (2016) 18.6-22.7 cm; Öner (2017) 5.8-20.02 cm; Kılınç ve ark. (2018) 19.5-22.0 cm arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmamızda DH melezlerinde koçan boyunun literatür bildirimleriyle benzer olduğu görülmektedir (Çizelge 5).

**Koçan çapı:** Yapılan varyans analizi sonuçları koçan çapının farklı dağılım gösterdiğini ve ekstrem değerlere sahip bireylerin bulunabileceğini göstermektedir (Çizelge 5). Bitkilerde ışık yetersizliği; fotosentez maddelerinde üretimin azalmasına, dolayısıyla koçana daha az karbonhidrat depolanmasına ve bu durumda, koçanda sıra sayısı ve tane uzunluğunu etkileyecek koçan çapının küçülmesine neden olmaktadır. Ayrıca gelişimin generatif periyodunda sıcak ve kuru havalardan olumsuz etkilenen çeşitlerin koçan kalınlığında azalmalar görülebildiği ve bitki sıklığının artmasıyla koçan çapının azaldığı saptanmıştır (Budak ve ark., 2005). Daha önce yapılan çalışmalarda koçan çapını Cömertpay (2008) 29-42 mm ve Öner (2011) 25.31-49.80 mm arasında değiştiğini bildirmiştir.

Çizelge 5. DH test melezlerinde incelenen özelliklere ilişkin ortalama değerler ve oluşun gruplar

Genotip	SPAD Değeri	BB (cm)	YE (cm)	İKY (cm)	GÇ (mm)	BKS (adet)	KB (cm)	KÇ (mm)
DZ-M-67 x Elioso-1	48.49 ± 1.0	199.42 ± 6.6 de	8.99 ± 1.3	71.67 ± 9.3	16.14 ± 1.1 c-e	1.46 ± 0.2 bc	15.22 ± 1.6 f	37.69 ± 1.4 ab
DZ-M-67 x Elioso-2	47.28 ± 5.6	207.20 ± 8.3 b-e	7.46 ± 0.7	59.83 ± 7.2	14.77 ± 1.2 a-e	1.25 ± 0.4 bc	18.27 ± 1.0 a-c	35.44 ± 2.5 b-d
DZ-M-67 x Elioso-3	48.17 ± 3.2	194.08 ± 5.2 e	7.77 ± 1.7	55.00 ± 5.9	19.40 ± 4.4 a	2.11 ± 0.4 a	17.16 ± 1.1 c-e	35.34 ± 3.6 b-d
DZ-M-56 x Elioso	50.58 ± 3.9	220.67 ± 17.0 ab	8.65 ± 0.2	77.17 ± 9.8	15.84 ± 1.5 a-e	1.48 ± 0.4 bc	19.19 ± 0.6 a-b	33.41 ± 4.6 cd
DZ-M-67 x Excel-1	49.99 ± 3.0	217.50 ± 10.4 a-c	7.77 ± 1.8	81.17 ± 7.5	16.51 ± 2.9 ab	1.24 ± 0.3 bc	17.77 ± 0.8 b-d	34.59 ± 4.0 cd
DZ-M-67 x Excel-2	49.10 ± 4.9	207.17 ± 3.9 b-e	7.59 ± 0.7	61.92 ± 7.2	19.64 ± 2.3 a-c	1.66 ± 0.2 ab	17.61 ± 2.1 b-d	32.49 ± 2.3 d
DZ-M-13 x Gariz	47.52 ± 6.2	211.11 ± 8.9 b-d	8.38 ± 1.3	70.89 ± 12.3	18.41 ± 0.4 de	1.39 ± 0.1 bc	16.46 ± 1.1 d-f	37.06 ± 1.3 a-c
DZ-M-56 x Gariz	44.48 ± 1.2	206.00 ± 8.4 c-e	8.85 ± 1.2	65.71 ± 13.3	15.05 ± 2.5 e	1.28 ± 0.2 bc	18.08 ± 0.7 a-d	35.32 ± 1.9 b-d
DZ-M-67 x Gariz	43.63 ± 4.1	197.00 ± 7.4 e	8.02 ± 0.7	63.92 ± 7.2	14.67 ± 2.5 e	1.14 ± 0.2 c	15.55 ± 0.7 ef	35.16 ± 2.3 b-d
Elioso	46.87 ± 11.3	228.00 ± 15.9 a	7.23 ± 1.1	76.29 ± 19.3	18.21 ± 2.0 b-e	1.41 ± 0.2 bc	19.59 ± 1.1 a	39.09 ± 2.1 ab
Excel	45.45 ± 6.7	216.50 ± 3.4 a-c	8.33 ± 0.8	61.67 ± 13.9	17.79 ± 1.1 e	1.58 ± 0.3 bc	19.82 ± 1.2 a	33.50 ± 3.5 cd
Gariz	46.92 ± 5.7	216.08 ± 5.8 a-c	8.77 ± 1.2	71.75 ± 6.9	14.89 ± 1.4 a-d	1.50 ± 0.6 bc	16.82 ± 1.3 c-f	39.68 ± 1.3 a
Ortalama	47.37	210.7	8.15	64.08	16.77	1.45	17.62	35.73
LSD	8.09	14.04**	öd	16.1	3.26*	0.46*	1.76**	4.14*
CV %	11.92	4.66	14.72	16.4	13.5	22.6	6.97	8.08

\*: P<0.05, \*\*: P<0.01 önem düzeyindedir. BB: Bitki Boyu, YE: Yaprak Eni, İKY: İlk koçan Yüksekliği, GÇ: Gövde Çapı, BKS: Bitkide Koçan Sayısı, KB: Koçan Boyu, KÇ: Koçan Çapı, ÖD: önemli değil.

**Koçanda sıra sayısı:** Koçanda sıra sayısının fazla olması istenen bir özellik olup genetik potansiyelin bir göstergesidir (Albayrak, 2019). Araştırmada elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre genotipler arasında bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Bu sonuç test melezlerinde koçanda sıra sayısı değerlerinin benzer seviyede olduğunu ve standart çeşitlerdeki gibi arzu edilen seviyede olduğunu göstermektedir (Çizelge 6). Farklı araştırmacılar koçanda sıra sayısının İlarlan ve ark. (2002) 9.9-14.9 adet; Öner (2017) 7.2-14.3 adet; Shengu (2017) 12-15 adet arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Koçanda sıra sayısına çeşit özelliğinin etkisi çevresel faktörlerden daha baskındır, verimi belirlemede etkili olduğu gibi taze tüketim için kullanımda da öne çıkan özelliklerden olması nedeniyle, çeşitlere ait koçanda sıra sayısının bilinmesinde yarar vardır (Abendroth ve ark., 2011). Elde edilen melezlerin koçanda sıra sayısı değerleri denemedeki standart çeşitlerden düşük olmakla birlikte, literatür bilgilerine göre iyi bir seviyede olduğu söylenebilir.

**Koçan sırasında tane sayısı:** Test melezleri arasında koçan sırasında tane sayısı bakımından istatistiki yönden önemli bir fark olmadığı ve genotiplerin sırada tane sayısı değerlerinin 18.69-27.67 adet arasında değiştiği belirlenmiştir (Çizelge 6). Koçan sırasında tane sayısı, çeşit özelliği olmasıyla birlikte çevresel faktörlerden en fazla etkilenen bir özelliktir (Abendroth ve ark., 2011). Bu nedenle çevresel faktörlere göre değişimi çok hızlıdır. Öner (2017) koçan sırasında tane sayısını 7.2-36.6 adet arasında değiştiğini bildirmiştir.

**Koçanda uç boşluğu:** Varyans analizi sonuçlarına göre koçanda uç boşluğu bakımından genotipler arasında farklılık ortaya çıkmamıştır. Bu sonuç test melezlerinde uç boşluğu değerlerinin benzer seviyede olduğunu ve standart çeşitlerdeki gibi arzu edilen seviyede olduğunu göstermektedir (Çizelge 6). Koçan uç boşluğu değerini Büyükerdem (2005) 1.1-1.5 cm; Albayrak (2013) 0.82-1.31cm arasında değiştiğini bildirmişlerdir.

**Tek koçan ağırlığı:** Tek koçan ağırlığı bakımından test melezleri ile hibrit çeşitler arasında önemli bir farklılık ortaya çıkmıştır. Genotiplerin tek koçan ağırlığı bakımından farklı dağılım

gösterdiği ve yüksek değerlere sahip bireylerin bulunabileceği belirlenmiştir. Tek koçan ağırlığı değeri bakımından genotiplerin ortalaması 41.55 g, en yüksek ve en düşük değere sahip genotipler arasında 37.63 g'lık bir fark oluşmuştur (Çizelge 6). Genotiplere ait tek koçan ağırlığı değerinin değişim sınırlarının çok geniş olduğu görülmektedir.

**Koçanda tane ağırlığı:** Çalışmada koçanda tane ağırlığının genotipler arasında farklı dağılım gösterdiğini ve test melezlerinde ekstrem değerlere sahip bireylerin bulunabileceğini göstermektedir. Koçanda tane ağırlığı bakımından en yüksek ve en düşük değere sahip genotipler arasında 32.91 g'lık fark oluşmuştur (Çizelge 6). Yapılan farklı çalışmalarda koçanda tane ağırlığını Cömertpay (2008) 66.3-173.3 g; Öner (2011) 23.54-186.86 g; Koca & Turgut (2012) 172.6-182.9 g olduğunu bildirmişlerdir. Elde ettiğimiz veriler literatür bilgileriyle kıyaslandığında mısırdaki tane verimini belirleyen en önemli unsurlardan olan koçanda tane ağırlığı değerlerinin çok düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu düşüşün genetik etkiden ziyade çiçeklenme dönemindeki yüksek sıcaklıktan kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir.

**Sömek çapı:** Nielsen (2002), mısırdaki küçük çaplı sömeklerin, büyük çaplı sömeklere oranla daha hızlı nem kaybettiğini ve hasada uygun hale geldiğini belirtmiştir. Çalışmada sonuçlar sömek çapının farklı dağılım gösterdiğini ve ekstrem değerlere sahip bireylerin bulunabileceğini göstermektedir. Çalışmada sömek çapı değerleri 21.89 mm ile 25.22 mm arasında değişmiştir (Çizelge 6). Babaoğlu (2003) 22.7-29.0 mm, Magorokosho (2006) 23-36 mm ve Öner (2011) sömek çapının 13.71-31.67 mm arasında değiştiğini bildirmişlerdir.

**Tane verimi:** Mısır bitkisinde tane verimi ekimden hasada kadar ekoloji ve yetiştirme tekniklerinin ortak etkilerinin genotiple olan interaksiyonu sonucunda ortaya çıkan bir karakterdir. Varyans analizi sonuçları tane veriminin farklı dağılım gösterdiğini ve ekstrem değerlere sahip bireylerin bulunabileceğini göstermektedir (Çizelge 6). Denemede ele alınan melezlerde tane veriminin genel olarak beklenen değerden düşük olduğu görülmektedir. Bu durum tepe ve koçan püskülü çıkışı döneminde yaşanan yüksek sıcaklıklara bağlanabilir. Tane verimini DH melezlerinin performans yönünden değerlendirdiğimizde dört melezin (DZ-M-13 x Gariz, DZ-M-56 x Elioso, DZ-M-67 x Elioso-1 ve DZ-M-67 x Excel-1) 448.2 kg da<sup>-1</sup> olan kontrol çeşitleri ortalamasından daha yüksek olduğu görülmektedir. Yapılan farklı çalışmalarda tane verimini Koca ve ark. (2010), ana üründe ortalama 1252.3 kg da<sup>-1</sup>, ikinci üründe ise ortalama 980.3 kg da<sup>-1</sup>; Erdal (2014), normal şartlarda 188.2-607.5 kg da<sup>-1</sup>, kuraklık stresi altında 27.6-229.4 kg da<sup>-1</sup> arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Ayrıca Turhal (2015) tane veriminin 648.0-1537.0 kg da<sup>-1</sup>; Gönülal ve ark. (2015) 846-1191 kg da<sup>-1</sup> arasında ve Topal (2016) 1472.4-1849.7 kg da<sup>-1</sup>; arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Turhal (2015), bitki sıklığının tane verimini artırdığını, Gönülal ve ark. (2015), tane şekli ve iriliği ile verim arasında ilişki olmadığını ancak sulama ile verim arasında güçlü ilişki olduğunu bildirmiştir. Elde ettiğimiz veriler DH melezlerinin birçoğunun başarılı bir sonuç verdiğini göstermektedir.

Çizelge 6. DH Test melezlerinde incelenen özelliklere ilişkin ortalama değerler ve oluşan gruplar

Genotip	KSS (adet)	KSTS (adet)	KUB (cm)	TKA (g)	KTA (g)	SÇ (mm)	TV (kg da <sup>-1</sup> )
DZ-M-67 x Elioso-1	11.29 ± 1.2	25.70 ± 2.8	1.44 ± 1.0	48.27 ± 15.5 a-d	38.22 ± 13.5 a-c	23.45 ± 0.7	608.84 ± 94.2 b
DZ-M-67 x Elioso-2	11.51 ± 0.8	22.18 ± 5.8	1.18 ± 0.6	41.77 ± 18.6 a-d	30.48 ± 15.2 a-d	23.20 ± 0.8	443.69 ± 164.7 c-e
DZ-M-67 x Elioso-3	11.67 ± 0.6	20.56 ± 2.7	1.50 ± 0.5	38.18 ± 31.1 a-d	29.71 ± 26.3 ab	21.89 ± 1.3	357.84 ± 96.6 ef
DZ-M-56 x Elioso	10.61 ± 1.0	18.73 ± 6.6	2.33 ± 1.1	34.42 ± 15.6 d	23.61 ± 13.4 cd	21.53 ± 0.8	549.55 ± 187.9 b-d
DZ-M-67 x Excel-1	12.03 ± 0.4	22.79 ± 4.9	1.51 ± 0.6	52.08 ± 17.5 cd	40.07 ± 15.8 cd	23.28 ± 1.4	612.68 ± 87.9 b
DZ-M-67 x Excel-2	11.58 ± 1.6	19.25 ± 5.4	1.44 ± 0.2	39.59 ± 7.0 ab	28.32 ± 7.4 a-d	21.77 ± 1.4	410.83 ± 38.2 de
DZ-M-13 x Gariz	12.29 ± 1.3	25.53 ± 0.7	1.22 ± 0.1	60.95 ± 19.9 a	47.91 ± 17.8 a	23.30 ± 1.4	832.82 ± 90.1 a
DZ-M-56 x Gariz	11.19 ± 1.6	20.71 ± 6.5	1.17 ± 0.5	28.09 ± 3.1 ab	19.59 ± 4.3 d	22.11 ± 1.0	286.32 ± 71.4 ef
DZ-M-67 x Gariz	11.61 ± 1.2	20.53 ± 4.6	1.31 ± 0.5	23.32 ± 2.7 ab	18.42 ± 1.3 ab	22.37 ± 0.7	199.22 ± 29.1 f
Elioso	13.27 ± 0.9	27.67 ± 4.7	1.68 ± 0.1	55.27 ± 11.5 b-d	38.03 ± 8.6 a-d	25.22 ± 1.4	582.83 ± 77.2 bc
Excel	12.19 ± 1.8	18.69 ± 4.0	1.81 ± 0.5	24.77 ± 5.2 d	20.25 ± 6.1 a-c	22.55 ± 0.6	311.75 ± 5.9 ef
Gariz	13.20 ± 1.4	23.67 ± 2.4	1.12 ± 0.2	51.93 ± 13.4 a-c	40.94 ± 12.6 b-d	23.08 ± 0.9	450.08 ± 187.1 b-e
Ortalama	11.87	22.17	1.48	41.55	31.29	22.81	470.53
LSD	öd	6.88	0.87	23.30*	15.00*	öd	164.75**
CV %	10.61	21.6	41.5	39.08	45.75	4.95	24.4



\*: P<0.05, \*\*: P<0.01 önem düzeyindedir. KSS: Koçanda Sıra Sayısı, KSTS: Koçan Sırasında Tane Sayısı, KUB: Koçan Uç Boşluğu, TKA: Tek Koçan Ağırlığı, KTA: Koçanda Tane Ağırlığı, SÇ: Sömek Çapı, TV: Tane Verimi, ÖD: önemli değil.

### 3.3. İncelenen özellikler arası korelasyon ilişkisi

Araştırmada test melezlerinde incelenen özelliklere ait korelasyon ilişkisine bakıldığında; tane verimi ile bitki boyu, ilk koçan yüksekliği, koçan sırasında tane sayısı ve tek koçan ağırlığı arasında pozitif ve önemli korelasyon ilişkisi olduğu belirlenmiştir. Ancak incelenen diğer özelliklerin tane verimi ile ilişkisi önemsiz bulunmuştur. Bitki boyu ile ilk koçan yüksekliği, koçan boyu, koçan sırasında tane sayısı, tek koçan ağırlığı, koçanda tane ağırlığı ve sömek çapı arasında pozitif ve önemli ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bitki yaş ağırlığı, gövde çapı, sömek çapı, koçan sırasında tane sayısı gibi birçok özellik verimi doğrudan etkilemektedir (Mousavi ve ark., 2019). Tane verimi ile bitki boyu, sıradaki dane sayısı, koçan yüksekliği ve 100 tane ağırlığı arasında istatistiksel olarak yüksek korelasyona sahip olduğunu bildirmişlerdir (Aman ve ark., 2020). Benzer sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da saptanmıştır (Maryam ve ark., 2010; Izzam ve ark., 2017; Shengu, 2017). Ayrıca benzer çalışmalarda bitki boyu ile koçan sayısı, koçanda tane sayısı arasında pozitif; koçan sayısı ile koçanda tane sayısı arasında negatif bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir (Alaei, 2012; Noor ve ark., 2018).

Çizelge 7. Özellikler arası korelasyon ilişkisi

Özellik	SPAD	BB	YE	İKY	GÇ	BKS	KB	KÇ	KSS	KSTS	KUB	TKA	KTA	SÇ
BB	0.17													
YE	-0.13	-0.10												
İKY	0.11	0.61**	-0.02											
GÇ	-0.02	0.25	-0.09	-0.06										
BKS	0.08	0.05	-0.32*	-0.10	0.42**									
KB	-0.19	0.42**	-0.02	0.03	0.29*	-0.14								
KÇ	-0.21	0.27	-0.02	0.20	0.05	-0.06	-0.01							
KSS	0.11	0.18	0.19	0.07	-0.04	-0.34*	0.21	0.27						
KSTS	-0.07	0.28*	-0.07	0.19	0.17	-0.01	-0.05	0.75**	0.15					
KUB	-0.03	0.19	-0.09	0.04	0.33*	0.19	0.31*	-0.11	-0.23	-0.07				
TKA	-0.04	0.38**	-0.04	0.40**	0.16	0.40**	-0.16	0.47**	-0.01	0.55**	0.05			
KTA	-0.02	0.32*	-0.01	0.38**	0.12	0.37*	-0.23	0.53**	0.01	0.59**	0.03	0.99		
SÇ	-0.23	0.36*	-0.13	0.31*	0.09	-0.16	0.32*	0.68**	0.32*	0.49**	0.04	0.33*	0.30	
TV	0.15	0.31*	-0.10	0.40**	0.24	0.25	-0.05	0.26	-0.05	0.36*	0.05	0.69**	0.67	0.28

\*: P<0.05, \*\*: P<0.01 önem düzeyindedir. BB: Bitki Boyu, YE: Yaprak Eni, İKY: İlk koçan Yüksekliği, GÇ: Gövde Çapı, BKS: Bitkide Koçan Sayısı, KB: Koçan Boyu, KÇ: Koçan Çapı, KSS: Koçanda Sıra Sayısı, KSTS: Koçan Sırasında Tane Sayısı, KUB: Koçan Uç Boşluğu, TKA: Tek Koçan Ağırlığı, KTA: Koçanda Tane Ağırlığı, SÇ: Sömek Çapı, TV: Tane Verimi.

### 4. Sonuç ve Öneriler

Araştırmada in vivo DH tekniği bir bütün olarak uygulanmıştır. Bazı genotiplerde sadece birkaç haploid tohum elde edilmiştir. Haploid tohumlarda kromozom katlaması kolşisin uygulamasıyla gerçekleştirilmiş ve uygulama sonrasında 37 genotipte dihaploid bitkiler elde edilebilmiştir. Kolşisin uygulaması sonrası dihaploid bitkilerden tohum elde edilmesi için serada 37 kendileme işlemi gerçekleştirilmiş ve yalnızca 6 genotipte tohum çoğaltımı yapılmıştır. Bu çalışmaya göre in vivo DH tekniğinin başarı oranını en çok düşüren aşamanın DH bitkilerin kendilenmesinde yaşandığı tespit edilmiştir.

Araştırmadan elde edilen deneyimlere göre in vivo DH tekniğinden yüksek başarı elde etmek için haploid tohum elde etme oranının düşük olması nedeniyle induserle yapılan melez sayısının artırılması ve ülke koşullarına uygun yüksek performanslı inducerler geliştirilmesi gerekmektedir. Kromozom katlaması esnasında çimlenme ve çimlenme sonrasında kayıpların fazla olması nedeniyle bu yöntemin daha hassas uygulanması için araştırmaların yürütülmesi faydalı olacaktır. Ayrıca in vivo DH tekniğinde teorik olarak %100 homozigot bitkiler elde edilmektedir. Bu durumun kromozom sayı

ve yapısındaki değişiklikler ve mutasyon anormallikleri oluşup oluşmadığı yönünden araştırılması ilerleyen yıllarda in vivo DH tekniğinden daha etkin yararlanılmasına katkı yapacaktır.

Test melezlerinin tarla denemelerinden elde edilen sonuçlara göre başta tane verimi olmak üzere incelenen tüm özellikler yönünden standart çeşitleri geçen DH melezleri tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlarla in vivo DH tekniği uygulanarak mısırdaki tüm ıslah süreci tamamlanmış ve ümitvar sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada ele alınan melezlerde tane veriminin genel olarak beklenen değerden daha düşük saptanmıştır. Bu durumun temel sebebi tepe ve koçan püskülü çıkışı döneminde yaşanan yüksek sıcaklıklar gösterilebilir. DZ-M-13 x Gariz, DZ-M-56 x Elioso, DZ-M-67 x Elioso-1 ve DZ-M-67 x Excel-1 DH melezleri tane verimi bakımından kontrol çeşitlerinden (448.2 kg da<sup>-1</sup>) daha yüksek performans göstermişlerdir. Ayrıca test melezlerinde incelenen özelliklerden tane verimi ile bitki boyu, ilk koçan yüksekliği, koçan sırasında tane sayısı ve tek koçan ağırlığı arasında pozitif ve önemli korelasyon ilişkileri saptanmıştır.

## Teşekkür

TAGEM/2014 AR-GE/43 nolu proje ile çalışmayı destekleyen Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü'ne ve proje materyali olan inducer hatlar ile ilgili katkı sağlayan Sakarya Mısır Araştırma Merkezi Müdürü Sayın Yavuz AĞI'ya ve ıslah genetik bölüm başkanı Rahime CENGİZ'e teşekkür ederiz.

## Kaynakça

- Abendroth, L. J., Elmore, R. W., Boyer, M. J., & Marlay, S. K. (2011). *Corn Growth and Development*, PMR 1009. Ames, IA, USA: Iowa State Univ.
- Alaei, Y. (2012). Correlation analysis of corn genotypes morphological traits. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(12), 2355-2357.
- Albayrak, Ö. (2013). *Diyarbakır koşullarına uygun şeker mısır (Zea mays L. saccharata sturt.) çeşitlerinin belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, Türkiye.
- Albayrak, Ö. (2019). *Bazı yerel mısır popülasyonlarının kurağa tepkilerinin belirlenmesi*. (Doktora Tezi), Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, Türkiye.
- Almeida, V. C., Trentin, H. U., Frei, U. K., & Lübberstedt, T. (2020). Genomic prediction of maternal haploid induction rate in maize. *The Plant Genome*, 13(1), e20014. doi:10.1002/tpg2.20014
- Alp, A., & Kahraman, Ş. (2017). Diyarbakır koşullarında ana ve ikinci ürün olarak yetiştirilen tane mısırın bazı tarımsal ve teknolojik özelliklerinin biplot analiz yöntemiyle karşılaştırılması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 27(4), 507-515. doi:10.29133/yyutbd.299291
- Aman, J., Bantte, K., Alamerew, S., & Sbhatu, D. B. (2020). Correlation and path coefficient analysis of yield and yield components of quality protein maize (*Zea mays L.*) hybrids at Jimma, Western Ethiopia. *International Journal of Agronomy*, 2020, 9651537. doi:10.1155/2020/9651537
- Babaoğlu, M. (2003). *Farklı kökenli mısır (Zea mays L.) genotiplerinin çeşitli agronomik ve kalite karakterleri bakımından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi*. (Doktora Tezi), Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, Türkiye.
- Budak, B., Alan, Ö., & Akdemir, H. (2005, Eylül). *Küçük Menderes koşullarında bazı melez mısır (Zea mays L.) çeşitlerinin hasıl verimi üzerine bir araştırma*. Türkiye VI. Tarla Bitkileri Kongresi, Antalya.
- Büyükerdem, N. İ. (2005). *Farklı çinko içerikli gübre uygulamalarının şeker mısırın (Zea mays L. saccharata sturt.) verim ve agronomik özelliklerine etkileri*. (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Cengiz, R., & Korkut, K. Z. (2020). Development of doubled haploid maize lines by using in vivo haploid technique. *Biotech Studies*, 29(1), 1-7. doi:10.38042/biost.2020.29.01.01
- Cerit, İ., Cömertpay, G., Oyucu, R., Çakır, B., Hatipoğlu, R., & Özkan, H. (2016). Melez mısır ıslahında in-vivo katlanmış haploid tekniğinde kullanılan farklı inducer genotiplerin haploid

- indirgeme oranların belirlenmesi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 25, 52-57. doi:10.21566/tarbitderg.280162
- Chase, S. S. (1969). Monoploids and monoploid-derivatives in maize (*Zea mays* L.). *The Botanical Review*, 35(2), 117-168.
- Chen, S., Li, L., & Li, H. (2009). *Maize Doubled Haploid Breeding*. Beijing, China: China Agricultural University Press.
- Coe, E. H., & Sarkar, K. R. (1964). The detection of haploids in maize. *Journal Heredity*, 55(5), 231-233. doi:10.1093/oxfordjournals.jhered.a107340
- Cömertpay, G. (2008). *Yerel mısır populasyonlarının morfolojik ve DNA moleküler işaretleyicilerinden SSR tekniği ile karakterizasyonu*. (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Dang, N. C., Munsch, M., Aulinger, I., Renlai, W., & Stamp, P. (2011). Inducer line generated double haploid seeds for combined waxy and opaque 2 grain quality in subtropical maize (*Zea mays* L.). *Euphytica*, 183, 153-160. doi:10.1007/s10681-011-0423-0
- Erdal, Ş. (2014). *Kendilenmiş mısır (Zea mays L.) hatlarının kuraklık stresine tolerans düzeylerinin belirlenmesi ve moleküler karakterizasyonu*. (Doktora Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- FAOSTAT. (2019). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#home> Erişim Tarihi: 12.09.2022.
- Gönülal, E., Güngör, H., & Soylu, S. (2015). Mısırdaki (*Zea mays* L.) kısıtlı sulama ile farklı tane şekil ve iriliklerinin verim ve bazı verim unsurları üzerine etkisi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 32(2), 24-31.
- Greenblatt, I. M., & Bock, M. (1967). A commercially desirable procedure for detection of monoploids in maize. *Journal Heredity*, 58(1), 9-13. doi:10.1093/oxfordjournals.jhered.a107543
- Izzam, A., Rehman, H., Sohail, A., Ali, S., Manzoor, H., & Hussain, Q. (2017). Genetic variability and correlation studies for morphological and yield traits in maize (*Zea mays* L.). *Pure and Applied Biology*, 6(4), 1234-1243. doi:10.19045/bspab.2017.600131
- İdikut, L., Zülkadir, G., Yürürdurmaz, C., & Çölkesen, M. (2015). Yerel cin mısırdaki genotiplerinin Kahramanmaraş koşullarında tarımsal özelliklerinin araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi*, 18(3), 1-8.
- İlarslan, R., Kaya, Z., Kandemir, İ., & Bretting, P. K. (2002). Genetic variability among Turkish pop, flint and dent corn (*Zea mays* L.) races: Morphological and agronomic traits. *Euphytica*, 128, 173-182. doi:10.1023/A:1020896805265
- Karaşahin, M., & Sade, B. (2011). Farklı sulama yöntemlerinin hibrit mısırdaki (*Zea mays* L. *indentata* S.) dane verimi ve verim unsurları üzerine etkileri. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25(2), 47-56.
- Kılınç, S., Karademir, Ç., & Ekin, Z. (2018). Bazı mısırdaki (*Zea mays* L.) çeşitlerinde verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 21(6): 809-816. doi:10.18016/ksutarimdoga.vi.463813
- Kırnak, H., Gençoğlu, C., & Değirmenci, V. (2003). Harran Ovası koşullarında kısıtlı sulamanın II. ürün mısır verimine ve bitki gelişimine etkisi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 34(2), 117-123.
- Kırtok, Y. (1998). *Mısır Üretimi ve Kullanımı*. İstanbul, Türkiye: Kocaoluk Basım ve Yayınevi.
- Koca, Y. O., Turgut, İ., & Ereku, O. (2010). Tane üretimi için yetiştirilen mısırdaki birinci ve ikinci üründeki performanslarının belirlenmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 47(2), 181-190.
- Koca, Y. O., & Turgut, İ. (2012). Mısırdaki (*Zea mays* L.) farklı ekim zamanlarının tane verimine, kuru madde birikimine, yaprak alanı indeksine ve bazı büyüme parametrelerine etkisi. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9(1), 1-10.
- Kuşçu, H., & Demir, A. O. (2012). Responses of maize to full and limited irrigation at different plant growth stages. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 26(2), 15-28.
- Kuşvuran, A., Kaplan, M., Nazlı, R. İ., Saruhan, V., & Karadağ, Y. (2015). Orta Kızılırmak Havzası ekolojik koşullarında bazı mısırdaki (*Zea mays* L.) çeşitlerinin silajlık olarak yetiştirilme

- olanaklarının belirlenmesi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 32(1), 57-67.
- Magorokosho, C. (2006). *Genetic diversity and performance of maize varieties from Zimbabwe, Zambia and Malawi*. (PhD), Texas A&M Üniversitesi Lisansüstü Çalışma Ofisi, Teksas, ABD.
- Maryam, A. B., Siah Sar, B., Khavari, S., Golbashy, M., Mehdi Nejad, N., & Alizadeh, A. (2010) Effects of genotype by environment interactions on morphological traits, yield and yield components of new grain corn (*Zea mays* L.) varieties. *Journal of Agroecology*, 2(1), 136-145. doi:10.22067/jag.v2i1.7612
- Mousavi, S. M. N., Mohammed, S., & Nagy, J. (2019, April). *Studying the relationships of various agronomic traits in maize using correlation analysis*. 18th Alps Adria Scientific Workshop At Cattolica, Italy.
- Nanda, D. K., & Chase, S. S. (1966). An embryo marker for detecting monoploids of maize (*Zea mays* L.). *Crop Science*, 6(2), 213-215. doi:10.2135/cropsci1966.0011183X000600020036x
- Nielsen, R. L. (2002). *Post-Maturity Grain Dry-Down in the Field* (pp. 5). Agronomy Depart., Purdue Univ., <http://www.kingcorn.org/news/timeless/GrainDrying.html>
- Noor, M., Khan, A. S., Ullah, H., Shahwar, D., Fahad, S., ... & Adnan, M. (2018). Heritability and correlation analysis of morphological and yield traits in maize. *Journal of Plant Biology Crop Research*, 2: 1008.
- Öner, F. (2011). *Karadeniz bölgesindeki yerel mısır (Zea mays L.) genotiplerinin agronomik ve teknolojik özelliklerinin belirlenmesi*. (Doktora Tezi), Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, Türkiye.
- Öner, F. (2017). Ordu ili yerel mısır (*Zea mays* L.) genotiplerinin morfolojik karakterizasyonu. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 3(2), 108-119. doi:10.24180/ijaws.344833
- Özmen, İ. (2008). *Bazı melez mısır çeşit ve genotiplerinin değişik ekim bölgelerindeki adaptasyon ve uyum yeteneklerinin belirlenmesi üzerine araştırmalar*. (Doktora Tezi), Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Prigge, V., & Melchinger, A. E. (2011). Production of Haploids and Doubled Haploids in Maize. In: V. M. Loyola-Vargas, & N. Ochoa-Alejo (Eds.), *Plant Cell Culture Protocols, Methods in Molecular Biology* (3<sup>rd</sup> Ed). New Jersey, UK: Humana Press Springer Verlag. doi:10.1007/978-1-61779-818-4\_13
- Sabancı, S. (2016). *Ege Bölgesinde yetiştirilen bazı mısır (Zea mays L.) çeşitlerinin verim, kalite ve antioksidan aktivitelerinin belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, Türkiye.
- Seitz, G. (2005). *The Use of Doubled Haploids in Corn Breeding* (pp. 1-7). In: Proc. 41st Annual Illinois Corn Breeders' School 2005, Urbana-Champaign, Illinois,.
- Shengu, M. K. (2017). Genetic study of some maize (*Zea mays* L.) Genotypes in humid tropic of ethiopia. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 7(1), 281-287.
- Soydemir, H. E., Yılmaz, A., & Çiftçi, V. (2021, December). *Bitki islahında haploid tekniğinin avantajları*. ISPEC 8th International Conference on Agriculture, Animal Sciences and Rural Development, Bingol, Turkey.
- Tekkanat, A., & Soylu, S. (2005). Cin mısırı çeşitlerinin tane verimi ve önemli kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(37), 51-60.
- Topal, B. (2016). *Mısırdaki (Zea mays L. indentata sturt.) koçan yaprağı klorofil miktarı ile tane verimi ve verim öğeleri arasındaki ilişkilerin path analizi ile saptanması*. (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Turhal, K. (2015). Eskişehir koşullarında değişik tohum sıklıklarının bazı melez mısır (*Zea mays* L.) çeşitlerinin tarımsal özelliklerine etkileri. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 16(2), 67-70.
- TÜİK. (2019). Türkiye İstatistik Kurumu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Verileri. <http://tuik.gov.tr/Start.do>. Erişim Tarihi: 05.06.2021.
- Yorgancılar, M., Yaşar, M. A., & Atalay, E. (2019). Mısır islahında indirgeyici hatların kullanımı ve dihaploidizasyon. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi*, 8(1), 170-177.

- Yozgatlı, O., Başaran, U., Gülümser, E., Mut, H., & Doğrusöz M. Ç. (2019). Yozgat ekolojisinde bazı mısır çeşitlerinin morfolojik özellikleri, verim ve silaj kaliteleri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22(2), 170-177. doi:10.18016/ksutarimdog.vi.450938
- Zararsız, D., Öztürk, L., Yanikoğlu, S., Turgut, İ., Kızık, S., & Bilgin, B. (2019). Production of double haploid plants using in vivo haploid techniques in corn. *Journal of Agricultural Sciences*, 25(1), 62-69. doi:10.15832/ankutbd.539000





Research Article

**The Applicability of Wheat SSR Markers to Analyzing the Molecular Diversity and Distribution of Orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) Genotypes from Eastern Anatolian Habitats**

Ahmad NABHAN<sup>1</sup>, Ösmetullah ARVAS<sup>2</sup>, M. Alp FURAN\*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Agriculture-Plant Biotechnology Shafak Organization, Gaziantep, Türkiye

<sup>2</sup> Department of Field Crops, Faculty of Agriculture, Van Yuzuncu Yil University, Van, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Agricultural Biotechnology, Faculty of Agriculture, Van Yuzuncu Yil University, Van, Türkiye

Ahmad NABHAN, ORCID No: 0000-0002-8125-8913, Ösmetullah ARVAS, ORCID No: 0000-0001-8713-2388, M. Alp FURAN, ORCID No: 0000-0002-0171-0405

\*Corresponding author e-mail: alpifuran@gmail.com

Article Info

Received: 06.03.2023

Accepted: 06.06.2023

Online August.2023

DOI:10.53433/yyufbed.1260839

Keywords

*Dactylis glomerata* L,  
Genetic diversity,  
Orchardgrass,  
SSR

**Abstract:** Türkiye is one of the world's nations with the greatest flora diversity in different plants. Moreover, it possesses a high level of plant genetic diversity. Orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) is one of the most important fodder species used during cool seasons since it is a hardy and perennial plant. The identification of Orchardgrass cultivars is essential for maximizing cultivar utilization, and safeguarding breeders' intellectual property. *Dactylis glomerata* L. is an allogamous, variable, monospecific genus with multiple subspecies distinguished by morphology, chromosomal count, and distribution. This genus has a single species, *Dactylis glomerata* L, which is comprised of multiple subspecies whose traits have not been exhaustively characterized. Using DNA assays that evaluated the transferability of nine SSR primers designed for wheat loci, the genetic diversity of 44 orchardgrass genotypes from eight naturally distributed locales in the Eastern Anatolia Area of Türkiye was calculated. On average, 6.78 alleles were discovered for each of the nine SSR primers, for a total of 61 alleles. A total of 54 polymorphic alleles were identified, with an average of 6.78 per primer. Polymorphism information content (PIC) values ranged from 0.320 (WMC96) to 0.626% (XBARC187). The average polymorphism rate of 88.89% suggests a high amount of genetic diversity among all studied genotypes. The average expected heterozygosity (He) ranged between 0.178 (Ağrı) to 0.882 (Erzurum). The genetic separation ranged from 0.01 to 0.66. In conclusion, our findings indicate that the *Dactylis glomerata* L genotypes gathered in Eastern Anatolia are a rich source of genetic variability, supplying a vast array of genetic material for orchardgrass breeding efforts.

**Doğu Anadolu Habitatlardan Domuz ayrığı (*Dactylis glomerata* L.) Türlerinin Moleküler Çeşitliliğinin ve Dağılımının Analizinde Buğday SSR Markerlerinin Uygulanabilirliği**

Makale Bilgileri

Geliş: 06.03.2023

Kabul: 06.06.2023

Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1260839

**Öz:** Türkiye, dünyanın flora çeşitliliği en fazla olan ülkelerinden biridir. Ayrıca, yüksek düzeyde bitki genetik çeşitliliğine sahiptir. Domuz ayrığı (*Dactylis glomerata* L.), dayanıklı ve çok yıllık bir bitki olması nedeniyle serin mevsimlerde kullanılan en önemli yem türlerinden biridir. Orchardgrass çeşitlerinin tanımlanması, çeşit kullanımını en üst düzeye çıkarmak ve yetiştiricilerin fikri mülkiyetini korumak için gereklidir. *Dactylis glomerata* L., morfoloji, kromozom sayısı ve dağılımı ile ayırt edilen çok sayıda alt türü olan allogam, değişken, monospesifik bir cinstir. Bu cinsin tek bir türü vardır,

**Anahtar Kelimeler**  
*Dactylis glomerata*,  
 Genetik çeşitlilik,  
 Meyve bahçesi çimi,  
 SSR

*Dactylis glomerata* L., özellikleri kapsamlı bir şekilde karakterize edilmemiş birden fazla alt türden oluşur. Buğday lokusları için tasarlanan dokuz SSR primerinin aktarılabiliğini değerlendiren DNA tahlilleri kullanılarak, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde doğal olarak dağılmış sekiz yerel bölgeden 44 Domuz ayrığı genotipinin genetik çeşitliliği hesaplandı. Ortalama olarak, dokuz SSR primerinin her biri için toplam 61 alel için 6.78 alel keşfedildi. Primer başına ortalama altı olmak üzere toplam 54 polimorfik alel tanımlandı. Polimorfizm bilgi içeriği (PIC) değerleri %0,320 (WMC96) ile %0,626 (XBARC187) arasında değişmektedir. %88.89'luk ortalama polimorfizm oranı, çalışılan tüm genotipler arasında yüksek miktarda genetik çeşitlilik olduğunu göstermektedir. Beklenen ortalama heterozigotluk (He) 0,178 (Ağrı) ile 0,882 (Erzurum) arasında değişmekteydi. Genetik ayırma 0.01 ile 0.66 arasında değişmektedir. Sonuç olarak, bulgularımız, Doğu Anadolu'da toplanan *Dactylis glomerata* L. genotiplerinin, Domuz ayrığı bitkisi ıslah çabaları için çok çeşitli genetik materyal sağlayan zengin bir genetik çeşitlilik kaynağı olduğunu göstermektedir.

## 1. Introduction

Türkiye is one of the world's wealthiest countries in terms of plant diversity. In addition, it contains a high amount of plant genetic diversity. Several variables are responsible for this diversity: temperature variances, topographic diversity, geological diversity, diversity of water sources, and altitude differences (Arı et al., 2014; Kaya, 2015). Using natural resources in plant breeding projects has given them a great deal of significance, particularly in terms of enhancing plant productivity and pastures, which are still deteriorating due to overgrazing (Ünal & Mutlu, 2016). According to Aygün et al. (2009), the region of Eastern Anatolia in Türkiye is home to numerous grasslands and forage crop species. In addition, it comprises 35 percent of the total pasture and meadow areas in Türkiye, which are considered a gene source for numerous plants utilized in pasture and meadows. To offer appropriate and affordable animal products by ensuring high-quality fodder for our animals, must develop pastures and cultivate forage crops within the agricultural sector (Uysal et al., 2015). Therefore, it is vital to establish, through breeding programs, varieties of high-quality fodder plants that may be grown in agricultural fields or other environmental settings (Jiang et al., 2013).

*Dactylis glomerata* L. is an allogamous, changeable, monospecific genus with numerous subspecies characterized by morphology, number of chromosomes, and range. The most common name for *D. glomerata* L. is orchardgrass (Garcia & Lindner, 1998; Bushman et al., 2011; Jiang et al., 2013). This genus has one species, *Dactylis glomerata* L, which consists of numerous subspecies whose characteristics have not been fully described (Yan et al., 2016), it is widely utilized for grazing and hay production around the globe (Xie et al., 2012; Jiang et al., 2013).

Orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) is one of the most important cool-season perennial and persistent feed grasses in Türkiye and many other temperate and cold-climate nations (Last et al., 2014; Yan et al., 2016). It is a major feed crop with high agronomic value in the eastern portion of Türkiye and other locations with climates similar to the east (Yan et al., 2016). Its economic worth derives from its excellent yield and disease resistance in a variety of environmental situations. Orchardgrass is a widespread grass that is well-adapted to severe water deficit situations because it maintains a greater photosynthetic rate than the majority of temperate pasture during the harshest drought conditions. In addition to its high fodder quality, sugar and protein levels, shade tolerance, and persistence (Last et al., 2014; Madesis et al., 2014). Identification of orchardgrass cultivars is necessary to guarantee purity for farmers, effective cultivar utilization, and intellectual property security for breeders.

Information on the genetic distance of plant germplasm will be an essential resource for identifying populations by determining the genetic relationship at a particular germplasm source. Information on the genetic link between genotypes can be utilized as a supplemental tool to phenotypic information at the beginning of the breeding program to improve breeding populations (Parmaksız, 2004). Genetic variability between genotypes can help breeders decide what materials to utilize when developing new genetic combinations (Parmaksız, 2004). Genotype collections from natural populations of agriculturally significant plant species have been utilized extensively in the

41 creation of better cultivars. Morphological markers and molecular markers have been utilized  
 42 extensively for the development of genetic resources and the investigation of rebreeding and breeding  
 43 genotypes (Madesis et al., 2014). Because they are reproducible, reliable, and independent of  
 44 environmental variables, molecular markers are utilized for the direct investigation of genetic variation  
 45 (Madesis et al., 2014). Molecular markers can advance our understanding of plant genetics and plant  
 46 breeding techniques. It is believed that the knowledge gathered through these new technologies will be  
 47 used to improve global food safety. Particularly, DNA markers have the potential to increase the  
 48 efficacy of plant breeding programs in a variety of areas, such as removing the fingerprints of genetic  
 49 stocks, determining genetic diversity, enhancing selection efficiency, and the application of  
 50 quantitative trait loci (QTL) (Gedil & Menkir, 2019). Bushman et al. (2011) developed an EST library  
 51 and SSR markers from salt-, drought-, and cold-stressed tissues for the enhancement of orchardgrass  
 52 genetic resources. Of the 1,162 SSR markers developed, approximately 80% exhibited amplification  
 53 products in orchardgrass germplasm and 40% in *Festuca* and *Lolium* species. Based on the putative  
 54 orthology, the Unigenes reported that the total number of genotyped bands was higher for tetraploid  
 55 accessions than for diploid accessions, and that Mediterranean subspecies and Central Asian  
 56 subspecies were in the same groups based on clustering analyses using information annotated from the  
 57 NCBI database for rice, Triticeae grasses, other Poaceae, and Arabidopsis. Numerous researchers have  
 58 conducted previous research on SSR efficacy between species within the same family. In order to  
 59 examine and quantify genetic diversity and interrelationships in orchardgrass germplasm, SSR  
 60 markers have been successfully utilized to determine the genetic diversity and interrelationships of  
 61 orchardgrass germplasm from diverse geographic locations (Xie et al., 2010a and 2010b; Xie et al.,  
 62 2012; Jiang et al., 2013; Madesis et al., 2014; Yan et al., 2016). Differently in this study, we tested  
 63 wheat-specific SSR primers on orchardgrass, a member of the same family as wheat. Using the  
 64 transferability of wheat SSR markers, the purpose of this study was to determine the genetic diversity  
 65 of *Dactylis glomerata* L. genotypes that occur naturally in the Eastern Anatolia Region of Türkiye.

66

## 67 2. Material and Methods

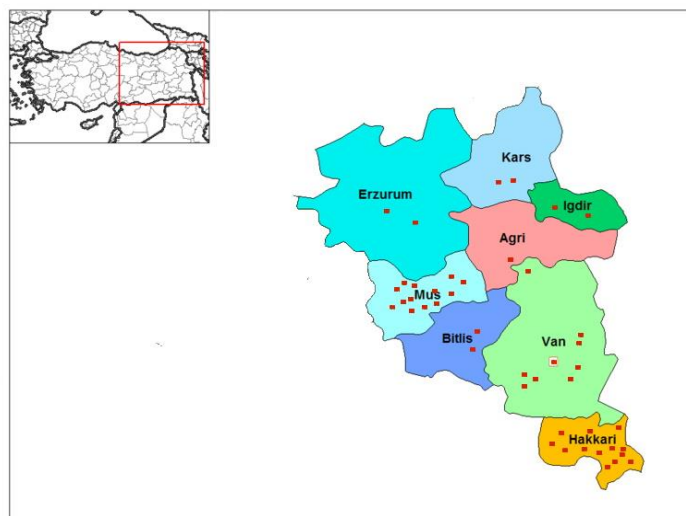
68

### 69 2.1. Plant material

70

71 Throughout the months of July and August, *Dactylis glomerata* L. genotypes were collected  
 72 from 43 naturally scattered locations encompassing 8 cities across the Eastern Anatolian Region of  
 73 Türkiye (Figure 1). In our investigation, the *Dactylis glomerata* L. (Amba) cultivar served as the  
 74 control. The study's genotype numbers and information about the geographical region's characteristics  
 75 are listed in Table 1.

76



77

78 Figure 1. The study's plants and their locations on the map.

79

80

81 Table 1. The study's genotypes and the geographic regions from where they were obtained

No	Genotype	Location-District	Latitude	Longitude	Height (m)
1	H2	Hakkari - Merzan	37° 33.639'	043°41.629'	2166
2	H3	Hakkari - Ademan	37° 33.502'	043° 40.417'	2543
3	H5	Hakkari - Kamışlı köyü	37° 34.259'	043° 32.195'	1717
4	H6	Hakkari - Cevzdibi köyü	37° 32.511'	043° 29.609'	1575
5	H9	Hakkari - Mergers -Adaman	37° 33.888'	043° 39.352'	2283
6	H21	Hakkari- Durkankaya 1	37° 37.980'	043° 37.165'	2999
7	H23	Hakkari - Durkankaya 2	37° 37.015'	043° 37.718'	2932
8	H26	Hakkari - Durkankaya 3	37° 34.835'	043° 38.185'	2499
9	H27	Hakkari - Durkankaya 4	37° 37.648'	043° 37.355'	3011
10	H41	Hakkari - Merkez 1	37° 43.755'	043° 58.169'	2347
11	H43	Hakkari - Merkez 2	37° 40.449'	043° 58.635'	1870
12	H45	Hakkari - Merkez 3	37° 43.478'	043° 59.139'	2238
13	H47	Hakkari - Merkez 4	37° 43.872'	043° 59.270'	2202
14	M61	Muş - Varto 1	39° 08.007'	041° 42.258'	2163
15	M67	Muş - Varto 2	39° 08.652'	041° 42.228'	2160
16	M71	Muş - Varto 3	39° 12.570'	041° 41.411'	1916
17	M72	Muş - Varto 4	39° 12.569'	041° 41.481'	1649
18	M74	Muş - Varto 5	39° 09.297'	041° 41.311'	2073
19	M75	Muş - Varto 6	39° 09.489'	041° 41.010'	2088
20	M79	Muş - Varto 7	39° 06.385'	041° 43.835'	2268
21	M80	Muş - Varto 8	39° 06.442'	041° 45.848'	2259
22	M81	Muş - Merkez 1	38° 35.980'	041° 33.786'	1438
23	M85	Muş - Merkez 2	38° 42.874'	041° 29.540'	1763
24	M110	Muş -Bulanık 1	38° 52.128'	041° 56.754'	1766
25	M113	Muş - tiğem	38° 47.539'	041° 23.257'	1260
26	M115	Muş - Bulanık 2	38° 49.314'	041° 72.540'	1532
27	A121	Ağrı - Patnos	39° 14.116'	042° 54.890'	1637
28	V141	Van- Erçiş	39° 05.549'	043° 37.911'	1750
29	R163	Iğdır - Merkez 1	38° 49.922'	043° 40.526'	1725
30	R175	Iğdır - Merkez 2	38° 49.111'	043° 40.311'	1680
31	V181	Van - Kampüs 1	38° 34.032'	043° 16.869'	1658
32	V189	Van - Kampüs 2	38° 57.119'	043° 28.818'	1665
33	V202	Van - Bostanci 1	38° 52.552'	043° 44.658'	1688
34	V207	Van - Bostanci 2	38° 52.890'	043° 44.995'	1692
35	K225	Kars - Dağpınar 1	40° 46.940'	043° 31.527'	2100
36	K240	Kars - Dağpınar 2	40° 47.510'	043° 31.681'	2119
37	V241	Van - Gavaş 1	38° 29.934'	043° 10.640'	1750
38	V247	Van - Gavaş 2	38° 30.179'	043° 10.777'	1752
39	V253	Van - Gavaş 3	38° 30.925'	043° 11.174'	1760
40	B261	Bitlis - Merkez 1	38° 42.022'	042° 12.354'	1558
41	B269	Bitlis - Merkez 2	38° 42.623'	042° 12.291'	1595
42	E283	Erzurum - Merkez-1	39° 90.226'	041° 97.740'	1870
43	E288	Erzurum- Merkez -2	39° 91.692'	041° 25.672'	1860
44	Con	Control			

## 84 2.2. Genomic DNA extraction

85  
86 Young, fresh leaf specimens from the chosen plant were collected and wrapped in aluminum  
87 foil paper. These samples were kept at  $-80^{\circ}\text{C}$  prior to DNA analysis. To isolate the DNA, a  
88 commercial DNA purification kit (Thermo Scientific GeneJET) was utilized, and DNA concentration  
89 was determined using Thermo NanoDrop 2000 devices. The quality of the extracted DNA was  
90 determined using the A260/A280 ratio. It was determined that the quality of DNA was between 1.8  
91 and 2.0 (Sambrook & Russell, 2001).

## 92 2.2. SSR Markers

93  
94 The GrainGenes Probe Report at <https://wheat.pw.usda.gov> was utilized to select randomly  
95 nine SSR primers generated from wheat two SSRs per linkage cluster (Furan et al., 2017a) (Table 2).  
96 PCR reactions were conducted in a total volume of 25  $\mu\text{l}$  containing 16.2  $\mu\text{l}$  water, 2.5  $\mu\text{l}$  10X DNA  
97 polymerase buffer, 1 ml dNTPs (2.5 mM each), 0.5  $\mu\text{l}$  each primer at 10 M, 0.3  $\mu\text{l}$  Taq polymerase at  
98 10 U/  $\mu\text{l}$  (Fermentas), and 2.5  $\mu\text{l}$  genomic DNA. The thermocycler was programmed as follows: an  
99 initial cycle at  $94^{\circ}\text{C}$  for 2 minutes, 40 cycles at  $94^{\circ}\text{C}$  for 30 seconds,  $60^{\circ}\text{C}$  (depending on the primer  
100 used) for 60 seconds, and  $72^{\circ}\text{C}$  for one minute, followed by a 10-minute extension at  $72^{\circ}\text{C}$ . The  
101 amplicons were size-fractionated on a 2% (w/v) high-resolution agarose gel in TBE buffer for 3–4  
102 hours and visualized with ethidium bromide. Thermo Scientific™ products. As a molecular weight  
103 marker, GeneRuler 100 bp Plus DNA Ladder was utilized, and the gel was screened using a Quantum  
104 ST4 UV transilluminator (Furan et al., 2017b).

105  
106  
107 Table 2. Names and sequences of randomly selected SSR primers from the Grain Genes database

No	Primer Name	Forward Primer (5'→3')	Reverse Primer (5'→3')
1	WMC96	GTACAACGGAGGCATTCTCAAGTT	TGTACATGGTGGTCTTGTGAGGT
2	WMC147	ATATGCATTGCCTGGAAGGAA	AATTC AACACGCCTCCCGAGTGT
3	WMC153	CTACCTATCCAAGCGATGGGGA	CGTGCAAATAATTCCCCGTGGGA
4	WMC276	TTGTCTTTCTTCCTCCACAAGCAGCGAA	ATTTCCAGTTGCCACCGACGAAGAAGCTT
5	WMC322	CACAAAGAGCAGCCACTTT	AAGTTGCTGACATCGATCCA
6	XBARC187	GCTCCAGGTCGGAGATGTGA	CACAACACATCCAGTGACCAGAGT
7	XBARC263	TTGCTCGGTATGAAGAAAATAGTCTTTCC	ATCTTGCAACTAGACTGAGGCAACCA
8	XGWM630	CTGTGTAAGAGCGCCAACAG	GTCTGAACGATGAACAGTACACGC
9	XGWM319	TAGCGACAGGATGGCCTCTTCT	GGGGAGCACGCCTTCGTTCT

## 108 2.3. Data analysis

109  
110 All amplicons were scored on the basis of their presence or absence to generate a binary  
111 matrix (1-presence/0-absence). Only distinct and robust bands were captured and utilized for further  
112 research. For each location, the number and size ranges of SSR-amplified alleles were computed. To  
113 evaluate genetic diversity, the polymorphism rate (P), number of total alleles, and polymorphic  
114 information content (PIC) were utilized. PIC was computed using the formula  $\text{PIC} = 1 - \sum P_{ij}^2$ , where  
115  $P_{ij}$  is the frequency of the  $j$ th allele over all alleles of the locus (Nei, 1973). The software GeneAIEx 6  
116 (Peakall & Smouse, 2006) was utilized to determine the Pairwise Region Matrix of Nei Genetic  
117 Distance and gene diversity (expected heterozygosity, HE).

118  
119  
120  
121  
122



### 123 3. Results

124

#### 125 3.1. Mobility of SSR markers between species

126

127 The nine SSR primers employed in eight Orchardgrass areas yielded 61 alleles, averaging 6.78  
 128 per SSR primer and ranging from 4 to 8. The range of polymorphism allele counts was between 3 and  
 129 7 with an average of 6.0 (Table 3). Indicating a high level of genetic variation, the proportion of  
 130 polymorphism per primer ranged from 75% to 100%, with an average of 88.69%. The average value  
 131 of polymorphism information content (PIC) ranged from 0.320 for (WMC96) to 0.626 for  
 132 (XBARC187), with a mean value of 0.48 (Table 3).

133

134 Table 3. Total numbers of alleles, numbers of polymorphism alleles, percentage of polymorphism  
 135 alleles, and polymorphism information content (PIC) values of 9 SSR primers used on  
 136 Orchardgrass genotypes in 43 naturally spread locations spanning 8 districts

Primer number	Total numbers of alleles	Numbers of polymorphism alleles	Percentage of polymorphism alleles	Polymorphism information content (PIC)
WMC96	7	6	85.71%	0.320
WMC147	6	6	100.00%	0.488
WMC153	8	6	75.00%	0.543
WMC276	6	6	100.00%	0.483
WMC322	8	6	75.00%	0.563
XBARC187	7	7	100.00%	0.626
XBARC263	8	7	87.50%	0.426
XGWM630	7	7	100.00%	0.522
XGWM319	4	3	75.00%	0.363
Total	61	54		
Mean	6.78	6.00	88.69%	0.48

137

#### 138 3.2. Genetic diversity

139

140 One of the ways used to determine genetic diversity is the criterion known as "expected  
 141 heterozygosity" and characterized as "genetic diversity" (Nei, 1973). The values calculated for each  
 142 SSR primer are displayed in (Table 4). The range of the Nei gene diversity index, or predicted  
 143 heterozygosity per location, was between 0.178 and 0.882. (Table 4). To generate the germplasm  
 144 similarity matrix, Nei's technique for genetic consistency and genetic distance was used to the  
 145 amplification data.

146

147 Table 0. Expected heterozygosity (He) values according to (Nei, 1973) for each SSR primers for each  
 148 region

regions /primers	WMC96	WMC147	WMC153	WMC276	WMC322	XBARC187	XBARC263	XGWM630	XGWM319	Mean
Hakkari	0.537	0.620	0.635	0.586	0.642	0.642	0.635	0.635	0.635	0.619
Muş	0.555	0.515	0.635	0.555	0.549	0.515	0.623	0.320	0.635	0.545
Ağrı	0.580	0.178	0.735	0.580	0.198	0.180	0.735	0.735	0.615	0.504
Van	0.320	0.383	0.650	0.320	0.531	0.490	0.650	0.650	0.642	0.515
Iğdır	0.405	0.700	0.540	0.438	0.700	0.716	0.568	0.494	0.540	0.567
Kars	0.593	0.670	0.667	0.560	0.670	0.670	0.650	0.650	0.642	0.641
Bitlis	0.265	0.593	0.611	0.265	0.550	0.550	0.615	0.611	0.615	0.519
Erzurum	0.745	0.875	0.675	0.745	0.882	0.875	0.645	0.675	0.675	0.755
Mean	0.500	0.567	0.643	0.506	0.590	0.580	0.640	0.596	0.625	

149

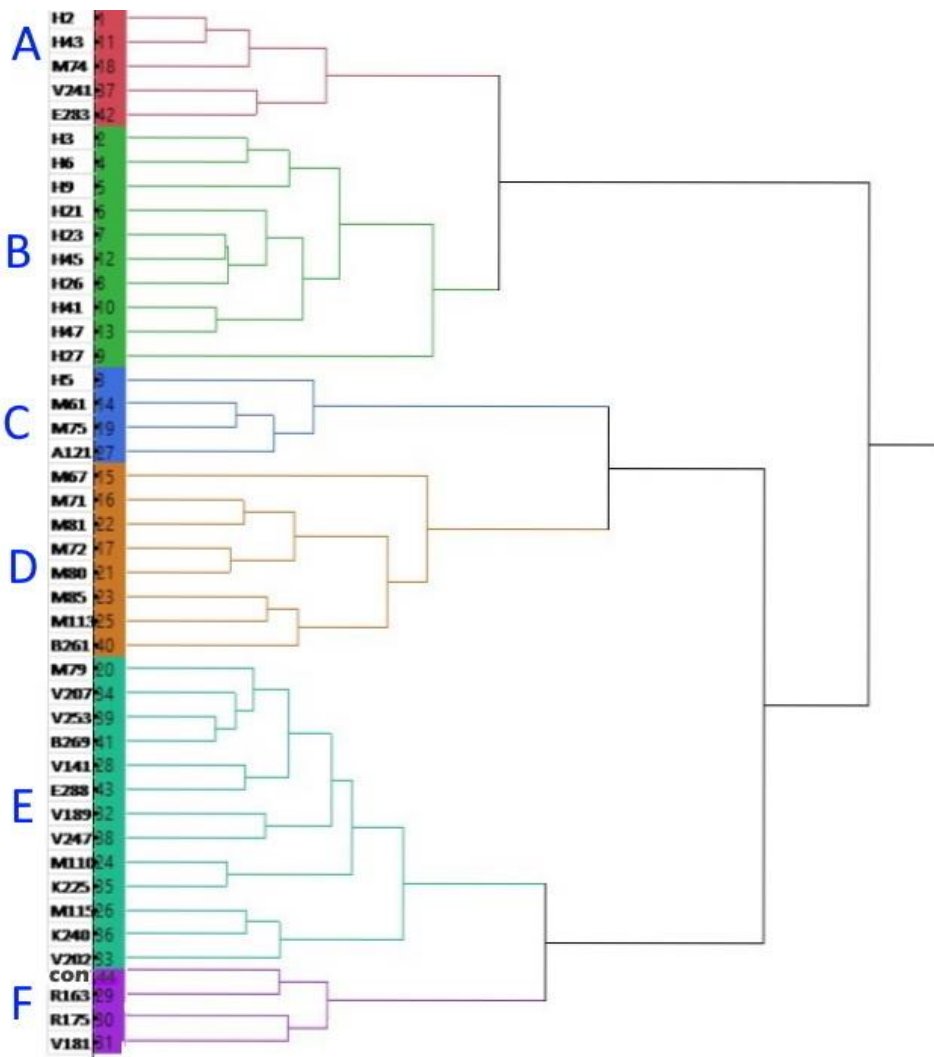
150 The average genetic distance (GD) for the eight Orchardgrass regions was 0.28, ranging from  
 151 0.01 to 0.66. The genetic gap between Van and Bitlis was the smallest (0.01), while the genetic  
 152 distance between Bitlis and Hakkari was the most (0.66) (Table 5).

153 Table 5. Matrix of pairwise distances between 44 orchardgrass genotypes scattered throughout 8  
154 districts

	Hakkari	Muş	Erzurum	Kars	Iğdır	Ağrı	Van	Bitlis
<b>Hakkari</b>	0.00							
<b>Muş</b>	0.05	0.00						
<b>Erzurum</b>	0.19	0.19	0.00					
<b>Kars</b>	0.35	0.45	0.10	0.00				
<b>Iğdır</b>	0.22	0.23	0.10	0.08	0.00			
<b>Ağrı</b>	0.24	0.25	0.22	0.20	0.07	0.00		
<b>Van</b>	0.48	0.40	0.36	0.26	0.38	0.50	0.00	
<b>Bitlis</b>	0.66	0.62	0.38	0.34	0.41	0.45	0.01	0.00

155  
156 **3.3. Phylogenetic construction**  
157

158 Phylogenetic analysis is typically employed to classify gathered germplasm. Either randomly  
159 or in a way that maximizes genetic distance can be used to generate groups (Uysal et al., 2015). To  
160 illustrate the links between Orchardgrass genotypes, a UPGMA dendrogram was constructed and  
161 graded as six groups labeled A-F (Figure 2).  
162



163  
164 Figure 2. UPGMA study of shared allele distance for 44 orchardgrass genotypes Group A is  
165 represented by red branches, Group B by green branches, Group C by blue branches, Group  
166 D by brown branches, Group E by turquoise branches, and Group F by purple branches.

167 Group A consisted of the genotypes H2, H43, M74, V241, and E283. The genotypes H3, H6,  
168 H9, H21, H23, H45, H26, H41, H47, and H27 comprised Group B. The following group members, C,  
169 were H5, M61, M75, and A121. Group D was made up of the phenotypes M67, M71, M81, M72,  
170 M80, M85, M113, and B261. Group E is comprised of the following genotypes: M79, V207, V253,  
171 B269, V141, E288, V189, V247, M110, K225, M115, K240, and V202. In addition to the control, the  
172 last group, F, included the three genotypes R163, R175, and V181.

173 The range of the number of genotypes per group was from 4 (Group F) and 13 (Group E). The  
174 largest group was E, with 13 genotypes gathered from 13 places and five regions (provinces) (Muş,  
175 Van, Bitlis, Erzurum, Kars), while the smallest was F, with three genotypes acquired from three  
176 locations and two regions (İğdır, Van).

177

#### 178 4. Discussion and Conclusion

179

180 The UPGMA dendrogram classified the genotypes into six groups, illustrating the  
181 relationships between orchardgrass genotypes from various regions of East Anatolia. Group A was  
182 comprised of the genotypes H2, H43, M74, V241, and E283. Whereas H3, H6, H9, H21, H23, H45,  
183 H26, H41, H47, and H27 genotypes comprised group B, H5, M61, M75, and A121 genotypes  
184 comprised Group C, Group D is made up of the genotypes M67, M71, M81, M72, M80, M85, M113,  
185 and B261, respectively. Ultimately, it was included in group E with the genotype combinations of  
186 M79, V207, V253, B269, V141, E288, V189, V247, M110, K225, M115, K240, and V202,  
187 respectively. Based on "Characterization of Orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) Using  
188 Morphological Traits and Molecular Markers" it has been determined that the genotypes comprising  
189 these subgroups share similar morphological characteristics. While the genotypes in Group A had the  
190 smallest glume length, the shortest lemma length, and the shortest flag leaf width, the genotypes in  
191 Group B had the shortest plant height, the shortest length of the upper internode, the shortest lemma  
192 length, the fewest nodes per plant, and the least amount of seed weight per 1000 seeds. The members  
193 of Group C had the greatest plant height, the longest flag leaf length, the longest flag leaf width, the  
194 longest length of the upper internode, the longest panicle length, and the longest glume length, Group  
195 D comprised the genotypes M67, M71, M81, M72, M80, M85, M113, and B261, with the least  
196 number of tillers per plant, the longest panicle length, the most node number as well as the greatest  
197 number of spikelets per panicle. Group E contains the most significant number of genotypes: M79,  
198 V207, V253, B269, V141, E288, V189, V247, M110, K225, M115, K240 and V202. These genotypes  
199 had the longest duration to heading, the longest length of the upper internode, the shortest flag leaf  
200 length, the shortest flag leaf width, the most node number, the shortest panicle length, and the highest  
201 of 1000 seed weight. The last group, F, included the three genotypes R163, R175, and V181 in  
202 addition to the control, which had the greatest number of tillers per plant, the least number of spikelets  
203 per panicle, and the longest lemma length. According to differences in physical traits between cluster  
204 groups (Aygün et al., 2009), these differences may not be caused by the environment. One more likely  
205 explanation is that only genetic characteristics differentiate these groups. Cluster analysis (CA)  
206 showed eight groupings and subgroups with 80% phenotypic similarity between hybrids and parents,  
207 according to the findings of Zhou et al. (2017), who categorized genotypes and parents graphically  
208 based on measured attributes.

209 Orchardgrass is a widespread fodder plant in mild regions. Robins et al. (2012) have  
210 demonstrated the significance of introducing genetic and phenotypic variety into breeding plans in  
211 previous research. According to Erfani et al. (2012) and Zhang et al. (2012), SSR markers are one of  
212 the most prevalent methods for examining genetic diversity. Using 29 SSR markers, Last et al. (2014)  
213 determined the genetic diversity of 20 populations of orchardgrass gathered from the Swiss Alps.  
214 These results are consistent with our research. In addition, numerous studies on orchardgrass  
215 genotypes have demonstrated that SSR markers are an effective method for determining the genetic  
216 diversity of a population (Ma et al., 2001; Mao et al., 2016; Yan et al., 2016; Demirkol, 2017). All the  
217 aforementioned study indicated that SSR markers are present in the majority of eukaryotic genomes  
218 and are regarded as extremely efficient, informative, credible, reproducible, and polymorphic. These  
219 benefits make it a useful method for determining and assessing the diversity of closely related kinds.  
220 This study employed nine SSR primer pairs to evaluate the genetic diversity of Orchardgrass  
221 genotypes gathered from several locales in Eastern Anatolia. Our SSR primers discovered an average

of 6.78 alleles per primer, for a total of 61 alleles. The identification of 54 polymorphic alleles, with an average of six alleles per primer, enabled us to obtain accurate results for distinguishing Orchardgrass genotypes and locating genetic diversity in various regions of Eastern Anatolia. Madesis et al. (2014) employed seven SSR primers to analyze the genetic diversity of Orchardgrass samples obtained from three distinct areas (northern, central, and southern Greece). SSR primers produced an average of six polymorphic bands per primer, ranging from two to ten. The results of this study are also consistent with the notion that a substantial level of polymorphism can be observed when a sufficient number of primers are used. Moreover, our results were comparable to those of Xie et al. (2010b), who employed 21 primer pairs to evaluate the genetic diversity of 16 accessions of *Dactylis glomerata* L. and obtained an average of 6.8 polymorphic alleles per locus from 143 polymorphic alleles. Earlier investigations of the genetic diversity of Orchardgrass plants from several geographic regions, which showed 7.9 alleles per locus (Jiang et al., 2013) and 7.8 alleles per locus (Mao et al., 2016), discovered that the average polymorphic allele of each marker was greater. 9.3 alleles per locus (Yan et al., 2016), 6.3 bands per primer (Xie et al., 2010a). The average polymorphism rate of the studied Orchardgrass genotypes was 88.69% (Table 3), indicating a substantial degree of genetic variation across the genotypes utilized in this study. In addition, when the polymorphism values obtained in this study are compared with those from previous research, EST-SSR polymorphism (P = 74.14%) (Xie et al., 2010a), SRAP polymorphism (P = 84.38%) (Zeng et al., 2008), and AFLP polymorphism (P = 84.0%) (Peng et al., 2008) confirm that the SSR markers we used in our study provide a highly accurate and reliable technique for assessing genetic diversity between and within *Dactylis glomerata* L genotypes. The transferability of the primers chosen for this investigation to orchardgrass species has also been demonstrated by these findings. In this investigation, the polymorphism information content varied between 0.320 and 0.626, with a mean of 0.48. Typically, the PIC value is a useful metric for comparing various molecular markers. It can also be used as an evaluation metric to determine the efficiency of primers in any DNA marker (Hongtrakul et al., 1997; Manifesto et al., 2001; Garcia et al., 2004). Based on the information content, Vaiman et al. (1994) established three scales of polymorphism information content: high (PIC > 0.5), intermediate (0.5 > PIC > 0.25), and low (PIC < 0.25). Xie et al. (2011) reported a mean polymorphism information content (PIC) of 0.33, which was in good accord with the results of this investigation (0.48). In contrast, the genetic variation amongst Orchardgrass plants gathered from different geographic regions was determined to be lower than in earlier studies: 0.848 (Jiang et al., 2013), 0.62 (Last et al., 2013), and 0.909 (Yan et al., 2016). Our findings indicated that the SSR technique was an effective means of determining the genetic differences across orchardgrass varieties. In addition, the results revealed that orchardgrass has a large number of genetic loci and a broad range of genetic variances among its genotypes. In addition, the SSR molecular marker identified genetic differences and interactions between eight orchardgrass groups effectively and reliably. The rising number of plants and genotype performance could be viewed as additional proof of how to adapt to different environmental circumstances and environments (Booy et al., 2000; Crawford & Whitney, 2010; Drummond & Vellend, 2012). Using genetic markers, a previous study on outbreeding in pasture genotypes such as *Lolium* spp. and *Festuca pratensis* revealed a high average predicted heterozygosity ranging from  $H_e = 0.3$  to  $0.7$  (Balfourier et al., 1998; Peter Schmid et al., 2008; Litrico et al., 2009). In our study the majority of locations, the mean anticipated heterozygosity ( $H_e$ ) ranged from 0.178 (Ağrı) to 0.882 (Erzurum). These findings are consistent with Last et al. (2013) and Madesis et al. (2014) who reported  $H_e$  values ranging from 0.44 to 0.59, 0.51 to 0.56, and 0.494 to 1.360, respectively. According to previous research on pastures and meadows, the patterns of genetic diversity are influenced by numerous factors, including space and time, habitat age, connectivity, and past use in a landscape and historical context (Münzbergová et al., 2013). Bitlis and Hakkari regions had the greatest genetic distance between them, as measured by  $GD = 0.66$ . Bitlis and Van genotypes had the smallest genetic distance between regions, with  $GD = 0.01$ . The average genetic distance (GD) reported for all locations was 0.28. These results align with those of Mao et al. (2016), who found that the average genetic distance amongst 19 Orchardgrass cultivars was 0.2629. While it was greater than the result of Last et al. (2013), who reported an average genetic distance of  $GD = 0.01$  to  $0.02$ , Last et al. (2014) reported that the genetic distance between genotypes was extremely small ( $D = 0.01$  to  $0.02$ ) and that there was no significant correlation between genetic distance among genotypes. The high genetic variation observed in our study may be attributed to the fact that the genotypes studied originated from a large eco-geographic range with wide variation in



277 habitat characteristics, such as slope or exposure, and relatively long distances between regions, as  
278 well as a large altitudinal and latitudinal range. Geographic distance tends to enhance genetic distance  
279 in a proportional manner. Our study determined that the average genetic distance between eight  
280 regions of Orchardgrass genotypes was 0.28 and that the average polymorphism rate of the studied  
281 Orchardgrass genotypes was 88.69%. These results demonstrated that plant samples' genetic diversity  
282 increased proportionally to their geographical origin. The introduction of new genetic resources and  
283 the release of new varieties is an essential necessity to adapt to agricultural settings and climate  
284 change-related environmental conditions.

285 Characterization of orchardgrass is vital for the protection and maintenance of this plant,  
286 which has a significant impact on the enhancement of animal husbandry and agricultural applications.  
287 This study examined the morphological and genetic variation of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.)  
288 gathered from numerous Eastern Anatolian locations. In addition, the study examined the ability of the  
289 gathered data to differentiate genotypes and regions of genotypes, as well as the relationships between  
290 traits. Researchers and plant breeders will be able to better understand and alter the vegetative and  
291 reproductive features of wild Orchardgrass genotypes thanks to the findings of this study. Regarding  
292 the characteristics evaluated in this study, Orchardgrass plants obtained from diverse regions of  
293 Eastern Anatolia display a wide range of variance. The wild populations of *Dactylis glomerata* L  
294 (Eastern Anatolia) displayed a high level of genetic diversity. This genetic variation can now be  
295 utilized in new variety of breeding initiatives. These *Dactylis glomerata* L. genotypes from our study  
296 may serve as valuable sources for plants that are adapted to distinct environmental circumstances. This  
297 study revealed that orchardgrass inhabits harsh situations and diverse habitats and that these  
298 populations retain a high degree of phenotypic and genetic variation. In addition, the study  
299 demonstrated that orchardgrass grown in stressful situations can supply beneficial genes for adaptation  
300 features, while populations from more favorable habitats can provide useful genes for breeding  
301 programs' quantitative and qualitative traits. Due to the significance of orchardgrass, extra care must  
302 be taken to conserve the natural settings in which its wild genotypes spread. Hence, all Orchardgrass  
303 genotypes gathered from natural habitats must be stored in a gene bank for greater protection and  
304 effective in situ preservation of the current prime germplasm through the protection of wild  
305 Orchardgrass. According to our findings, there is a vast range of variance among Orchardgrass plants  
306 collected from diverse regions of Eastern Anatolia in terms of the analyzed traits, and this has  
307 significant implications for genetic diversity. The SSR results are extremely valuable for generating  
308 and enhancing new orchardgrass types. Our study's findings will provide further information for  
309 breeding programs and the advancement of orchardgrass genotypes; they may also assist in enhancing  
310 and modernizing the variety of current germplasm resources. In particular, transferable primers allow  
311 researchers to perform genetic analyses in different species or species groups using previously  
312 characterized primers. This can increase efficiency in genetic research, saving cost and time. Even  
313 though our study gave a good basis for describing orchardgrass genotypes, future research should  
314 focus on collecting and storing orchardgrass genotypes from all over the world to create a database of  
315 genotype fingerprints for germplasm protection and control, as well as to improve animal husbandry  
316 and agriculture.

317

### 318 **Acknowledgements**

319

320 The authors extend their appreciation for providing necessary research facilities and support  
321 for the completion of this work to Van Yuzuncu Yil University.

322 Support for this work was supplied by Van Yuzuncu Yil University, Bilimsel Araştırma  
323 Projeleri Koordinasyon Birimi (project code FDK-2019-7650).

324

### 325 **References**

326

327 Arı, S., Kargıoğlu, M., Temel, M., & Konuk, M. (2014). Traditional tar production from the Anatolian  
328 black pine [*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe var. *pallasiana*] and its  
329 usages in Afyonkarahisar, Central Western Turkey. *Journal of Ethnobiology and*  
330 *Ethnomedicine*, 10, 29. doi:10.1186/1746-4269-10-29



- 331 Aygün, C., Çakal, Ş., & Kara, A. (2009). Characterization of some cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.)  
 332 lines from the natural rangelands of Eastern Anatolia. *Biological Diversity and Conservation*,  
 333 2(2), 57-64.
- 334 Balfourier, F., Charmet, G., & Ravel, C. (1998). Genetic differentiation within and between natural  
 335 populations of perennial and annual ryegrass (*Lolium perenne* and *L. rigidum*). *Heredity*, 81,  
 336 100-110. doi:10.1046/j.1365-2540.1998.00381.x
- 337 Booy, G., Hendriks, R. J. J., Smulders, M. J. M., Van Groenendael, J. M., & Vosman, B. (2000).  
 338 Genetic diversity and the survival of populations. *Plant Biology*, 2(4), 379-395. doi:10.1055/s-  
 339 2000-5958
- 340 Bushman, B. S., Larson, S. R., Tuna, M., West, M. S., Hernandez, A. G., Vullaganti, D., Gong, G.,  
 341 Robins, J. G., Jensen, K. B., & Thimmapuram, J. (2011). Orchardgrass (*Dactylis glomerata*  
 342 L.) EST and SSR marker development, annotation, and transferability. *Theoretical and*  
 343 *Applied Genetics*, 123(1), 119-129. doi:10.1007/s00122-011-1571-2
- 344 Crawford, K. M., & Whitney, K. D. (2010). Population genetic diversity influences colonization  
 345 success. *Molecular Ecology*, 19(6), 1253-1263. doi:10.1111/j.1365-294x.2010.04550.x
- 346 Demirkol, G. 2017. Domuz Ayırığı (*Dactylis glomerata* L.) Populasyonlarında Genetik Çeşitliliğin  
 347 Belirlenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*: 7(2): 289–294.
- 348 Drummond, E. B. M., & Vellend, M. (2012). Genotypic diversity effects on the performance of  
 349 *Taraxacum officinale* populations increase with time and environmental favorability. *PLoS*  
 350 *One*, 7(2), e30314. doi:10.1371/journal.pone.0030314
- 351 Erfani, J., Ebadi, A., Abdollahi, H., & Fatahi, R. (2012). Genetic diversity of some pear cultivars and  
 352 genotypes using simple sequence repeat (SSR) markers. *Plant Molecular Biology Reporter*,  
 353 30, 1065-1072. doi:10.1007/s11105-012-0421-y
- 354 Furan, M. A., Geboloğlu, M. D., & Arpali, D. (2017a). Dayanıklı R55 (6al/6vs) translokasyon hattı ile  
 355 lokusa özel ssr markerleri kullanılarak endemik tir buğday (*Triticum aestivum* L. ssp. *vulgare*  
 356 Vill. v. *Leucospermum* Körn) genotipinin Yr-26 sarı pas hastalık direncinin değerlendirilmesi.  
 357 *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 27(4), 521-530.  
 358 doi:10.29133/yyutbd.342092
- 359 Furan, M. A., & Geboloğlu, M. D. (2017b). Two different molecular markers (SSR and IPBS)  
 360 assessment on *Coriandrum sativum* L. with capillary electrophoresis. *Fresenius*  
 361 *Environmental Bulletin*, 26(7), 4568-4573.
- 362 Garcia, A., & Lindner, R. (1998). *Dactylis glomerata* genetic resources: Allozyme frequencies and  
 363 performance of two subspecies on an acid sandy loam with summer drought. *Euphytica*, 102,  
 364 255-264. doi:10.1023/A:1018377513189
- 365 Garcia, A. A. F., Benchimol, L. L., Barbosa, A. M. M., Gerald, I. O., Souza Jr, C. L., & de Souza, A.  
 366 P. (2004). Comparison of RAPD, RFLP, AFLP and SSR markers for diversity studies in  
 367 tropical maize inbred lines. *Genetics and Molecular Biology*, 27(4), 579-588.  
 368 doi:10.1590/S1415-47572004000400019
- 369 Gedil, M., & Menkir, A. (2019) An integrated molecular and conventional breeding scheme for  
 370 enhancing genetic gain in maize in Africa. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1430.  
 371 doi:10.3389/fpls.2019.01430
- 372 Hongtrakul, V., Huestis, G. M., & Knapp, S. J. (1997). Amplified fragment length polymorphisms as a  
 373 tool for DNA fingerprinting sunflower germplasm: genetic diversity among oilseed inbred  
 374 lines. *Theoretical and Applied Genetics*, 95, 400-407. doi:10.1007/s001220050576
- 375 Jiang, L. F., Zhang, X. Q., Ma, X., Huang, L. K., Xie, W. G., Ma, Y. M., & Zhao, Y. F. (2013).  
 376 Identification of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) cultivars by using simple sequence  
 377 repeat markers. *Genetics and Molecular Research: GMR*, 12(4), 5111-5123.  
 378 doi:10.4238/2013.october.29.5
- 379 Kaya, S. (2015). *Yabani arpa populasyonları ve bazı arpa çeşitlerinin agro-morfolojik ve moleküler*  
 380 *karakterizasyonu ile kalite özellikleri ve çinko eksikliğine toleranslarının saptanması.*  
 381 (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- 382 Last, L., Widmer, F., Fjellstad, W., Stoyanova, S., & Kölliker, R. (2013). Genetic diversity of natural  
 383 orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) populations in three regions in Europe. *BMC Genetics*,  
 384 14(1), 102. doi:10.1186/1471-2156-14-102

- 385 Last, L., Lüscher, G., Widmer, F., Boller, B., & Kölliker, R. (2014). Indicators for genetic and  
386 phenotypic diversity of *Dactylis glomerata* in Swiss permanent grassland. *Ecological*  
387 *Indicators*, 38, 181-191. doi:10.1016/j.ecolind.2013.11.004
- 388 Lindner, R., & Garcia, A. (1997). Geographic distribution and genetic resources of *Dactylis* in Galicia  
389 (northwest Spain). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 44, 499-507.  
390 doi:10.1023/A:1008690831828
- 391 Litrico, I., Bech, N., Flajoulot, S., Cadier, D., Talon, C., Gibelin, C., & Barre, P. (2009). Cross-species  
392 amplification tests and diversity analysis using 56 PCR markers in *Dactylis glomerata* and  
393 *Lolium perenne*. *Molecular Ecology Resources*, 9(1), 159-164. doi:10.1111/j.1755-  
394 0998.2008.02168.x
- 395 Ma, J., Zhou, R., Dong, Y., Wang, L., Wang, X., & Jia, J. (2001). Molecular mapping and detection of  
396 the yellow rust resistance gene Yr26 in wheat transferred from *Triticum turgidum* L. using  
397 microsatellite markers. *Euphytica*, 120(2), 219-226. doi:10.1023/A:1017510331721
- 398 Madesis, P., Abraham, E. M., Kalivas, A., Ganopoulos, I., & Tsafaris, A. (2014). Genetic diversity  
399 and structure of natural *Dactylis glomerata* L. populations revealed by morphological and  
400 microsatellite-based (SSR/ISSR) markers. *Genetics and Molecular Research*, 13(2), 4226-  
401 4240. doi:10.4238/2014.june.9.8
- 402 Manifesto, M. M., Schlatter, A. R., Hopp, H. E., Suárez, E. Y., & Dubcovsky, J. (2001). Quantitative  
403 evaluation of genetic diversity in wheat germplasm using molecular markers. *Crop Science*,  
404 41(3), 682-690. doi:10.2135/cropsci2001.413682x
- 405 Mao, J.-X., Luo, D., Wang, G.-W., Zhang, J., Yang, Y.-M., Zhang, X.-Q., & Zeng, B. (2016). Genetic  
406 diversity of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) cultivars revealed by simple sequence  
407 repeats (SSR) markers. *Biochemical Systematics and Ecology*, 66, 337-343.  
408 doi:10.1016/j.bse.2016.05.004
- 409 Münzbergová, Z., Cousins, S. A. O., Herben, T., Plačková, I., Mildén, M., & Ehrlén, J. (2013).  
410 Historical habitat connectivity affects current genetic structure in a grassland species. *Plant*  
411 *Biology*, 15(1), 195-202. doi:10.1111/j.1438-8677.2012.00601.x
- 412 Nei, M. (1973). Analysis of gene diversity in subdivided populations. *Proceedings of the National*  
413 *Academy of Sciences*, 70(12), 3321-3323. doi:10.1073/pnas.70.12.3321
- 414 Parmaksız, İ. (2004). *Analysis of genetic variation among Turkish oxytona section species of papaver*  
415 *genus using Rapd markers*. (PhD), University of Ankara, Institute of Natural and Applied  
416 Sciences, Ankara, Turkey.
- 417 Peakall, R., & Smouse, P. E. (2006). GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic  
418 software for teaching and research. *Molecular Ecology Notes*, 6(1), 288-295.  
419 doi:10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x
- 420 Peng, Y., Zhang, X., Deng, Y., & Ma, X. (2008). Evaluation of genetic diversity in wild orchardgrass  
421 (*Dactylis glomerata* L.) based on AFLP markers. *Hereditas*, 145(4), 174-181.  
422 doi:10.1111/j.0018-0661.2008.02038.x
- 423 Peter Schmid, M. K. I., Boller, B., & Kölliker, R. (2008). Habitat and management affect genetic  
424 structure of *Festuca pratensis* but not *Lolium multiflorum* ecotype populations. *Plant*  
425 *Breeding*, 127(5), 510-517. doi:10.1111/j.1439-0523.2007.01478.x
- 426 Robins, J. G., Bushman, B. S., & Jensen, K. B. (2012). Dry matter yield combining ability among nine  
427 sources of orchardgrass germplasm. *Euphytica*, 188, 419-428. doi:10.1007/s10681-012-0707-z
- 428 Sambrook, J., & Russell, D. W. (2001). *Molecular Cloning: A Laboratory Manual* (Vol. 1). NY, USA:  
429 Cold Spring Harbor Laboratory.
- 430 Ünal, S., & Mutlu, Z. (2016). Morphological and agronomical characteristics of a Rhizomatous  
431 crested wheatgrass (*Agropyron cristatum* L. Gaertn.) collected from Ankara Province. *Tarla*  
432 *Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 1-10. doi:10.21566/tbmaed.28558
- 433 Uysal, P., Uzun, M., Ozgoz, M. M., Yazici, A., Terzioglu, K., Aksakal, E., Dumlu, S. E., Cakal, S., &  
434 Haliloglu, K. (2015). Morphological and seed yield characteristics of orchardgrass ecotypes of  
435 Eastern Anatolia Region. *Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics*, 1, 78-83.
- 436 Vaiman, D., Mercier, D., Moazami-Goudarzi, K., Eggen, A., Ciampolini, R., Lépingle, A., ..., &  
437 Guerin, G. (1994). A set of 99 cattle microsatellites: characterization, syntenic mapping, and  
438 polymorphism. *Mammalian Genome*, 5, 288-297. doi:10.1007/BF00389543

- 439 Xie, W.-G., Zhang, X.-Q., Cai, H.-W., Liu, W., & Peng, Y. (2010a). Genetic diversity analysis and  
 440 transferability of cereal EST-SSR markers to orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.).  
 441 *Biochemical Systematics and Ecology*, 38(4), 740-749. doi:10.1016/j.bse.2010.06.009
- 442 Xie, W.-G., Zhang, X.-Q., Ma, X., Cai, H.-W., Huang, L.-K., Peng, Y., & Zeng, B. (2010b). Diversity  
 443 comparison and phylogenetic relationships of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.) germplasm as  
 444 revealed by SSR markers. *Canadian Journal of Plant Science*, 90(1), 13-21.  
 445 doi:10.4141/CJPS08192
- 446 Xie, W., Zhang, X., Cai, H., Huang, L., Peng, Y., & Ma, X. (2011). Genetic maps of SSR and SRAP  
 447 markers in diploid orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) using the pseudo-testcross strategy.  
 448 *Genome*, 54(3), 212-221. doi:10.1139/G10-111
- 449 Xie, W. G., Lu, X. F., Zhang, X. Q., Huang, L. K., & Cheng, L. (2012). Genetic variation and  
 450 comparison of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) cultivars and wild accessions as revealed  
 451 by SSR markers. *Genetics and Molecular Research: GMR*: 11(1), 425-433.  
 452 doi:10.4238/2012.february.24.1
- 453 Yan, D., Zhao, X., Cheng, Y., Ma, X., Huang, L., & Zhang, X. (2016). phylogenetic and diversity  
 454 analysis of dactylis glomerata subspecies using SSR and IT-ISJ markers. *Molecules*, 21(11),  
 455 1459. doi:10.3390/molecules21111459
- 456 Zeng, B., Zhang, X.-Q., Lan, Y., & Yang, W.-Y. (2008). Evaluation of genetic diversity and  
 457 relationships in orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) germplasm based on SRAP markers.  
 458 *Canadian Journal of Plant Science*, 88(1), 53-60. doi:10.4141/CJPS07017
- 459 Zhang, Q., Li, J., Zhao, Y., Korban, S. S., & Han, Y. (2012). Evaluation of genetic diversity in  
 460 Chinese wild apple species along with apple cultivars using SSR markers. *Plant Molecular  
 461 Biology Reporter*, 30, 539-546. doi:10.1007/s11105-011-0366-6
- 462 Zhou, L., Kallida, R., Shaimi, N., Barre, P., Volaire, F., Gaboun, F., ..., & Fakiri, M. (2017).  
 463 Characterization of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.) population for growth traits and summer  
 464 dormancy. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(12), 4378-4384.  
 465 doi:10.26872/jmes.2017.8.12.461  
 466



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/pub/yyufbed>



Derleme Makale

### Türkiye’de Konut Sorununun Toplu Konut Olgusu Üzerinden Dönemsel Olarak İncelenmesi

Mustafa GÜLEN

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 65030, Van, Türkiye  
Mustafa GÜLEN, ORCID No: 0000-0001-5012-6291  
Sorumlu yazar e-posta: mustafagulen@yyu.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 30.09.2022  
Kabul: 18.02.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1182714

#### Anahtar Kelimeler

Konut,  
Konut sorunu,  
Toplu konut,  
Toplu Konut İdaresi,

**Öz:** Konut, insanın beşerî gereksinimleri (barınma, uyuma, yeme, içme vb.) ile sosyal ve psikolojik ihtiyaçlarına cevap veren fonksiyonel hacimleri barındırır. Bu sebeple tarih boyunca her çağda insanların en önemli sorunlarından birisi olarak süregelmiştir. Mimarlık pratiğinin de en temel araştırma konularından birisi olan konut, XIX. ve XX. yüzyıldan bu yana hem gelişmiş birçok ülkede hem de Türkiye’de önemli tartışma başlıklarından birisidir. Çünkü bu yüzyıllar ile birlikte konutun üretim biçimi değişmiştir. Tekil olarak, kişilere özgü üretilen konutların toplumsal, ekonomik ve siyasal dinamiklerle birlikte kitlesel olarak üretilmeye başlandığı izlenmektedir. Dünyada Endüstri Devrimi ile işçilerin barınma problemini çözmeye yönelik başlayan toplu konut inşa etme süreci günümüzde hala başvurulan önemli konut üretim modellerinden birisidir. Türkiye’de günden güne artan nüfusun barınma gereksinimi, yüksek kira bedelleri, kent çeperlerinde artış gösteren imara aykırı, plansız yapılaşmalar konut sorununun varlığını gösteren önemli emareler olarak yorumlanmaktadır. Geç Osmanlı Dönemi’nden 2000’li yıllara kadar geçen süreçte her 20-30 yılda bir farklı konut politikaları yürütülerek uygulamaya geçirilmiştir. 2000’li yıllardan sonra ise Türkiye’deki konut sorununun çözümünde toplu konut üretimi önemli bir rol oynamakta; toplu barınma kültürü de nüfusun hızla arttığı ve hızlı büyüyen kentlerde yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada Türkiye’deki konut sorunu toplu konut olgusu üzerinden kronolojik bir şekilde Geç Osmanlıdan başlayarak günümüze kadar dönemsel olarak derlenmiştir. Çalışmada ayrıca bir asırlık süreçte toplu konut uygulamalarının kapsamı, hedefi ve bu süreçlerde yer alan aktörlerin rolleri üzerinde durulmuştur.

### Periodic Analysis of the Housing Problem in Türkiye Through the Mass Housing Phenomenon

#### Article Info

Received: 30.09.2022  
Accepted: 18.02.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1182714

#### Keywords

Housing,  
Housing problem,  
Social housing,  
Public housing

**Abstract:** Housing contains functional volumes that respond to human needs (shelter, sleeping, eating, drinking, etc.) and social and psychological needs. For this reason, it has continued as one of the most important problems of people of every age throughout history. Housing, which is one of the most basic research subjects of architectural practice, is in the XIX. and XX. century, it has been one of the important topics of discussion both in many developed countries and in Türkiye. Because with these centuries, the production style of the house has changed, and it is observed that the houses that are produced individually for individuals are started to be mass-produced together with the social, economic and political dynamics. The mass housing construction process, which started to solve the housing problem of the workers with the industrial revolution in the world, is one of the important housing production models that is still used today.



The housing requirement of the population increasing day by day in Türkiye, high rental prices, and unplanned, unplanned constructions that are increasing in the city periphery are interpreted as important signs showing the existence of the housing problem. From the late Ottoman to the 2000s, different housing policies were discussed and tried to be implemented in 20-30 years. After the 2000s, mass housing production plays an important role in solving the housing problem in Türkiye; The culture of collective housing has also become widespread in rapidly growing cities where the population is rapidly increasing. In this study, the housing problem in Türkiye has been compiled chronologically from the late Ottoman period to the present through the mass housing phenomenon. The study also focuses on the scope and target of mass housing practices over a century and the roles of the actors involved in these processes.

## 1. Giriş

*“20. yüzyılın en marazi konularından biri ‘konut sorunu’dur. Her dönemde evrensel ve yerel ölçeklerde yeniden gündeme gelir. Her gündeme gelişinde fazla konuşulmuş olmanın ağırlığını, tekrarlanmaktan aşınmış, tüketilmiş söylemlerin hantallığını üzerinde taşır. Öte yandan dönemin yeni önceliklerini, değerlerini de içine katarak rejenere olur, yenilenir. Mimarlığın ‘konut sorunu’ ile ilişkisi de bu ikilemin izini taşımıştır” (Bilgin, 1998).*

Konut, insanın en temel gereksinimlerinden biri olan barınma ihtiyacını karşılayan bir mekân olarak tanımlanabilir. 1948 tarihli İnsan Hakları Evrensel Bildirgesi tüm insanların barınma hakkına sahip olduğunu belirtti. 1966 tarihli Ekonomik Toplumsal ve Kültürel Haklar Uluslararası Sözleşmesi ise taraf tüm devletlerin konut hakkını tanıdığına vurgu yapar (Çoban, 2012). Türkiye’de barınma hakkı ile ilgili maddeler her ne kadar Anayasalara girmişse de bu sözleşmenin kabulü 2003 yılında gerçekleşmiştir (Keleş, 2007). İnsanlar, ilk dönemlerde doğal yaşamın tehlikeleri ve zor iklim koşulları karşısında hayatta kalmak için basit barınaklar inşa etmişlerdir. Zamanla değişen ihtiyaç ve gereksinimler barınma birimlerinin hem anlamının hem de üretim biçiminin dönüşümüne sebep olmuştur. Sözelimi günümüzde konutun barınma birimi olmanın ötesinde dayanıklı bir tüketim maddesi, toplumsal statü göstergesi, toplumsal huzurun bir parçası ve bir yatırım enstrümanına dönüştüğü söylenebilir (Kömürlü, 2006). Tarih boyunca her çağda insanların en önemli sorunlarından birisi olarak süregelen barınmanın dünyada belirgin olarak hissedilmesi sanayileşme sonrası döneme denk gelir. Bu dönemde yaşanan göçler, hızlı kentleşme ve hızla artan nüfus sonucu konut sorunu ortaya çıkmıştır. Türkiye’de ise konut sorunu ve sorunun çözümüne ilişkin yürütülen çalışmalar çeşitli aşamalardan geçmiştir. Bu sebeple konut/toplu konut meselesini incelerken Geç Osmanlı’dan başlayarak günümüze kadar dönemlendirme yapmak mümkündür. Osmanlı’da 19. yüzyılda başlayan çağdaşlaşma hareketi kentleri de etkilemiştir. Bu dönemde ilk defa Akaretler sıraevler grubu ile bir toplu konut üretiminin gerçekleştiği bilinmektedir. Cumhuriyet’in kurulması ile birlikte Ankara’da devlet memurlarının barınma problemi ortaya çıkmış, bu yönde adımlar atılmış ve konut kooperatiflerine destek sağlamak amacıyla Eytam Bankası kurulmuştur (Aydın, 2019). Türkiye’de 1923-1950 yılları arasında sanayi yatırımlarının hız kazandığı görülmektedir. Bu dönemde kamu kurumlarının çalışanlarının barınma sorununu çözmeye yönelik işçi evleri inşa ettiği bilinmektedir (Bakar & Yamaçlı, 2017). Ne yazık ki nicel olarak artan işçi konutlarında sağlık ve kalite açısından bir düşüş söz konusu olmuş bu alanlarda yeterli nitelikli bir yaşam alanı oluşturulamamıştır (Keleş, 1966). 1950’li yıllarda başlayan hızlı kentleşme özellikle düşük gelirli insanların konut sorununu doğurmuştur. 1980’li yıllar konut üretiminin devlet tarafından desteklendiği ve kitlesel olarak yapıldığı bir dönemdir. 2000’li yıllardan günümüze geldiğinde ise toplu konut üretiminin hem özel sektör tarafından yapıldığı hem de TOKİ’nin ülke genelinde sayıları yüzbinleri bulan konut ürettiği söylenebilir (Gülen, 2019). Sorunun çözümü için her ne kadar farklı dönemlerde farklı modeller geliştirilmişse de özellikle sabit gelirli dar ve orta kesim için yeterli sayıda nitelikli, erişilebilir konut üretilmemiştir. Bu süreçte büyükşehirlerde kent çeperlerinde sağlıksız, plansız ve imara aykırı yerleşim birimleri ortaya çıkmış ve zamanla merkezi yönetimler tarafından çıkarılan yasalarla bu alanlar meşrulaştırılmıştır. Dolayısıyla konut sorunu barınmanın ötesinde kentle bütünleşememe, kentsel rantın tek elde toplanması, hukuka aykırı yapılaşma, tarihi, kültürel ve doğal çevrenin



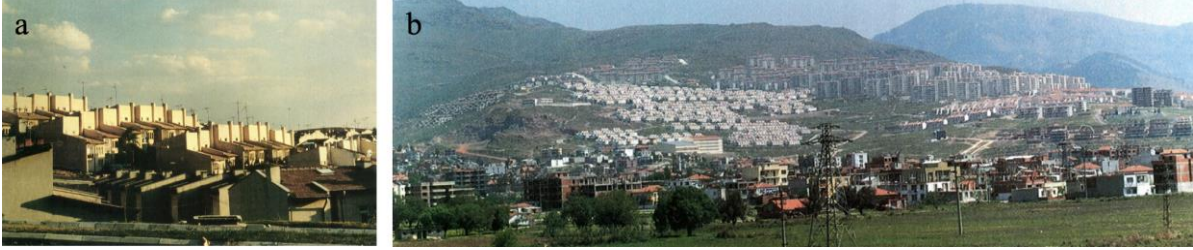
bozulması vb. boyutları olan karmaşık bir olguya dönüşmüştür (Karasu, 2005). Türkiye’de sorunun en belirgin boyutu farklı gelir gruplarının konut ediniminde fırsat eşitliğinin olmamasıdır (Alkan & Uğurlar, 2015). Özellikle dar gelirli olanların bu sorundan en fazla etkilenen kesim olduğu söylenebilir. Sorunun çözümü için öne sürülen en önemli modellerden birisi toplu konut üretimidir. Toplu konut kavramı bir üretim ölçeğine işaret etmektedir. Sosyal ve fiziksel alt yapısı ile birlikte tek seferde birden fazla konutun üretilmesidir (Hasol, 1995). Türkiye’de 1960’lı yıllardan başlayarak kitlesel bir konut üretiminin olduğu görülmektedir. 2000’li yıllara gelindiğinde ise özellikle Toplu Konut İdaresi (TOKİ) tarafından sayıları yüzbinleri bulan ve toplumun farklı kesimlerine hitap eden konut üretiminin devam ettiğini söylemek mümkündür. 1960’lı yıllardan başlayarak merkezi idarenin sorunun çözümü için farklı kamu kurumları ve özel sektörle iş birliği yaptığı izlenmektedir. Bu doğrultuda konut üretimi, arsa temini ve mali destek sağlama yoluyla belediyeler, yapı kooperatifleri ve birlikleri, özel toplu konut şirketleri, toplu konut idaresi vb. özel ve kamu kurumları ile iş birliği yürütüldüğü bilinmektedir. Bu çalışma, Türkiye’de hala güncelliğini koruyan konut sorunu ve soruna yönelik farklı dönemlerde üretilen politikaların gündeme getirildiği, farklı boyutlarıyla analiz edildiği derleme bir çalışmadır. Çalışmada, ilk olarak genel hatlarıyla Türkiye’deki konut sorununa değinilecektir. Sonrasında ise bir üretim biçimi olarak toplu konut olgusunun gelişimi, farklı boyutları ve toplu konut üretiminde yer alan aktörlerin rolleri üzerinde durulacaktır. Bu bağlamda Türkiye’deki konut sorunu ve bu sorunun çözümüne ilişkin öne sürülen toplu konut olgusunun dönemsel bir analizi yapılacaktır.

## 2. Genel Hatlarıyla Türkiye’de Konut Sorununun Arka Planı

Konut, barınmanın ötesinde kullanıcıların mahremiyetini koruyan, kendilerini güvende hissetmelerine ve sağlıklı bir yaşam sürmelerine imkân tanıyan bir mekân olarak da tariflenebilir (Bayraktar, 2006; Kara & Palabıyık, 2009). Yerleşim birimlerindeki yapılar içinde en fazla yeri kaplayan konutlar, aynı zamanda biçimlendikleri yapı stokunun da hem sosyal hem de fiziksel karakterini belirleme potansiyeline sahiptir (Bingöl, 2015). Dünyada Endüstri Devrimi, I. ve II. Dünya Savaşları ile belirgin bir hale gelen konut sorununun Türkiye’deki seyri 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren başlamaktadır (Şekil 1). Türkiye’de özellikle 1950’li yıllarda kırdan kente başlayan göçler, kentsel nüfusun hızlı artışı, toplumsal yapıdaki değişim ve hızlı kentleşme ile birlikte kent çeperlerinde imara aykırı, plansız yapıların ortaya çıktığı bilinmektedir. Farklı dönemlerde çıkarılan yasalar ve imar aflarıyla bu yapılar meşrulaştırılmaya çalışılmıştır. Kent çeperlerinde hızlı artan bu yapılar, giderek artan konut talebi ve yüksek kira bedelleri konut sorununun önemli göstergeleri olarak değerlendirilmiştir. Ve fakat konut sorununun sadece nicel bir soruna dönüştürülmesi sorunun çok yönlü niteliğinin tartışılmasını engellemektedir. Konut sorunu sadece barınmaya indirgenemeyecek kadar karmaşık, konut alanlarının kentsel çevreyle bütünleşme, kentlerin tarihi kültürel ve doğal çevrelerinin korunması, gecekondulaşmanın ve rantın engellenmesi vb. birçok mesele ile doğrudan ilişkilidir. Konutun özellikle dar gelirli olanlar için sosyal bir güvence olduğu, üst gelir grupları için de bir yatırım nesnesi ve toplumsal bir statü göstergesi olduğu unutulmamalıdır. Günümüzde halen en önemli sorunlardan birisi olan konut sorununa ilişkin merkezi ve yerel yönetimlerin nitelikli, erişilebilir konut üretmediği veya gerekli desteği sağlayamadığı bilinmektedir. Ortaya çıkan konut açığının giderilmesi için farklı dönemlerde farklı konut politikaları uygulanmıştır. Türkiye’de konut sorununun çözümü için atılan ilk adımlardan birisi 1958 yılında İmar ve İskân Bakanlığı’nın kurulmasıdır. Bakanlığın en önemli görevlerinden birisi Türkiye genelinde tüm yerleşimlerin planlanmasının yönlendirilmesi, denetim altında tutulması ve ülke koşullarına uygun konut politikalarının geliştirilmesi olarak tariflenmiştir (Sönmez, 1979).



Şekil 1. Ankara İsrail evleri perspektif çizimi 1955 (Gülen Türker, 2021).



Şekil 2. a) 1983 yılında tamamlanan Batıkent konutları, b) 1989 yılında tamamlanan Egekent konutları (Eryıldız, 1995).



Şekil 3. Türkiye kentlerinde yapı yoğunluğu (Demirtaş, 2020).

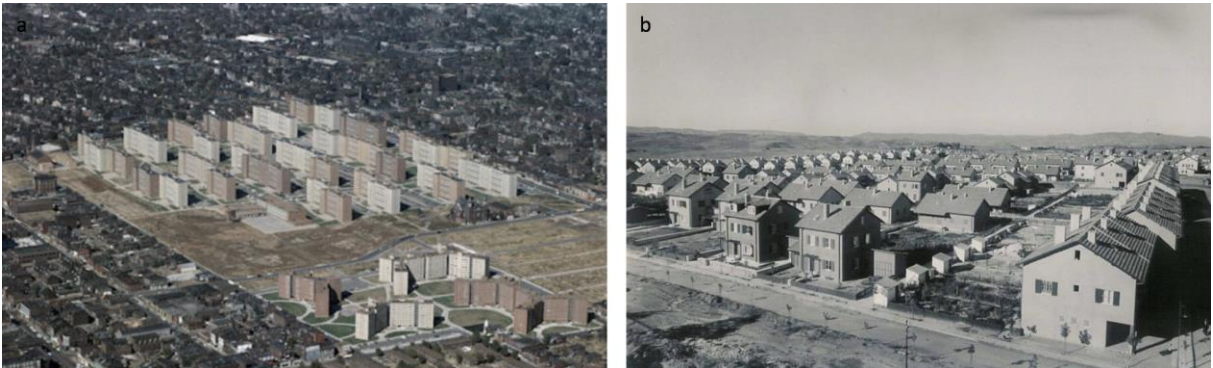


Gün geçtikçe büyüyen konut sorununun çözümü için merkezi idarenin konut ve arsa üretimi gerçekleştirdiği, konut üretimine mali destek sağlamak amacıyla Emlak Bankası, Arsa Ofisi Genel Müdürlüğü, Toplu Konut İdaresi (TOKİ) vb. yapılar kurduğu ama bunların da yetersiz kaldığı bilinmektedir. 1970’li yıllarda yerel yönetimlerin de sorunun çözümü için kooperatifler vasıtasıyla konut ve arsa üretmeye başladıkları bu bağlamda Batı-kent, Ege-kent, EVKA, Doğukent vb. uygulamaların yapıldığı ama yaşanan ekonomik ve siyasi krizler neticesinde bu çalışmaların da devam edemediği bilinmektedir (Karasu, 2005) (Şekil 2). Konut üretiminde önemli aktörlerden birisi olan kooperatiflerin de 1980 sonrası devletten yeterince destek alamadığı dar ve orta gelirliilerin konut sorununu çözmek yerine üst gelir gruplarına hitap eden oluşumlara döndüğü görülmektedir. 1984 yılında dar gelirliiler için konut üretmek, konut üretimine maddi destek vermek amacıyla kurulan Toplu Konut İdaresi (TOKİ) de yıllar içinde bu amacının dışına çıkmıştır. 1990’lı yıllarda devam eden ekonomik ve siyasi krizler, yaşanan yüksek enflasyon vb. sebepler devletin bu alana yatırım yapmamasına sebep olmuş ve sorun büyüyerek devam etmiştir. 2003 yılından itibaren devletin geniş yetkiler verdiği TOKİ Türkiye genelinde sayıları yüzbinleri bulan konutlar üreterek konut ve kentsel dönüşüm uygulamalarında önemli bir aktör haline gelmiştir. İnsanın gündelik yaşamının büyük bir kısmının içinde geçtiği konutlar, fonksiyonel, çevresel, estetik ve psikolojik açıdan belirli konfor standartlarına sahip olmalıdır (Clemente & De Matteis, 2010) (Şekil 3). Ancak TOKİ tarafından üretilen bu konutların genel olarak bu standartlar açısından sorunlu oldukları hem kullanıcılar hem de toplumun farklı kesimleri tarafından sürekli dile getirilmektedir (Gülen, 2019).

### 3. Bir Üretim Biçimi Olarak Toplu Konut Olgusuna Dönemsel Bakış

*“Yeni bir çağ başlamıştır, yeni bir ruh var. Bu yenilenme döneminde mimarlığın ilk görevi, değerlerin yeniden gözden geçirilmesini, konutu oluşturan öğelerin yeniden değerlendirilmesini sağlamaktır. Toplu üretim, çözümlenme ve deneye dayanır. Toplu üretim ruhunu yaratmalıyız”* (Corbusier, 1999).

Toplu konut, toplu barınma için fonksiyonel bir çözüm önerisi olmanın yanında daha fazla bireyin alt yapı, sosyal ve kültürel olanaklardan yararlandığı bir üretim biçimi olarak da tariflenebilir. Toplu konut, sınırlı bir alanda çok sayıda konutun bir anda üretildiği, yapı yoğunluğunun yüksek olduğu ve hızlı üretim teknolojisinin kullanıldığı bir üretim modelidir. Çoğunlukla özel sektör tarafından üretilip pazarlanan toplu konutlar hem üretimlerindeki yenilikçi standartlar hem de çevreleriyle kurdukları ilişki üzerinden yeni bir yaşam biçiminin de ilk örnekleri olarak değerlendirilebilirler (Şekil 4). Dünyada toplu konut üretim süreci bazı kırılma noktaları üzerinden irdelenmektedir. Endüstri Devrimi ile kentleşmenin hızlanması ve II. Dünya Savaşı sonrası ortaya çıkan barınma problemi kitlesel konut üretiminin hızlanmasına sebep olmuştur. 19. yüzyılın ikinci yarısında Almanya’da üretim ölçeğinin artış yönünde değişmesi konut sorununun en önemli sebepleri arasında sayılabilir (Engels, 1992).



Şekil 4. (a) Pruitt-Igoe St. Louis (1955), (b) Levent Sementi/İstanbul-1950 (Koyuncu, 2011).

Türkiye’nin de bu süreçten etkilendiği, barınma sorununun çözümü için toplu konut üretimine başvurulduğu ama sorunun günümüze kadar devam ettiğinden söz etmek mümkündür. Bu dönemde devletin de bu alana iki şekilde müdahale ettiği görülmektedir. Devlet, bir taraftan kooperatiflere ve

müteahhitlere destek vererek büyük ölçekli projelerin üretilmesini sağlarken diğer taraftan toplu konut idaresi ile piyasanın içinde doğrudan yer almaktadır (Güldehan Atay, 2011). Türkiye’de toplu konut alanında yapılan çalışmalar genellikle süreci kentsel politikalar üzerinden tanımlayarak dönemlere ayırır. Geç Osmanlı- Erken Cumhuriyet ile başlayan bu süreç, 1950-1980 dönemi ve 1980 sonrası olarak kabaca üç dönem üzerinden incelenebilir. Türkiye’de yaşanan konut sorununun çözümü için dönemsel olarak konut politikalarının geliştirildiği ve uygulandığı bilinmektedir. Osmanlı Dönemi’ndeki geleneksel şehir yapısı ve yerleşme dokusu Geç Osmanlı’dan başlayan bir süreçte ve Cumhuriyet’in ilanı ile birlikte değişim ve dönüşüme uğramıştır (Düzenli & Düzenli, 2019). 1950’li yıllarda ülke genelinde yaşanan gelişmeler planlı bir kentleşmenin ve konut ihtiyacını karşılayacak sistemli bir programın gündeme alınmasını zorunlu kılmıştır. 1980’li yılların başında ise konut programlarının devletin resmi bir politikası haline gelmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda Toplu Konut ve Kamu Ortaklığı İdaresi Başkanlığı kurulmuştur (Anonim, 2021). 2000 sonrası dönemde ise çıkarılan yasalar ile TOKİ’nin görev ve yetkileri artırılmış ve toplu konut üretiminde Türkiye’de önemli bir aktör olmasının yolu açılmıştır (Çizelge 1). Türkiye’deki toplu konut örnekleri istisnalar sayılmazsa ‘anonim’ kullanıcılar için üretilen dolayısıyla kullanıcı istek ve ihtiyaçlarını göz ardı eden, uygulamalardır (Şekil 5). Bu sebeple konutlar genel bir kalite sorunu üzerinden sürekli eleştirilmektedir (Batuman, 2022).



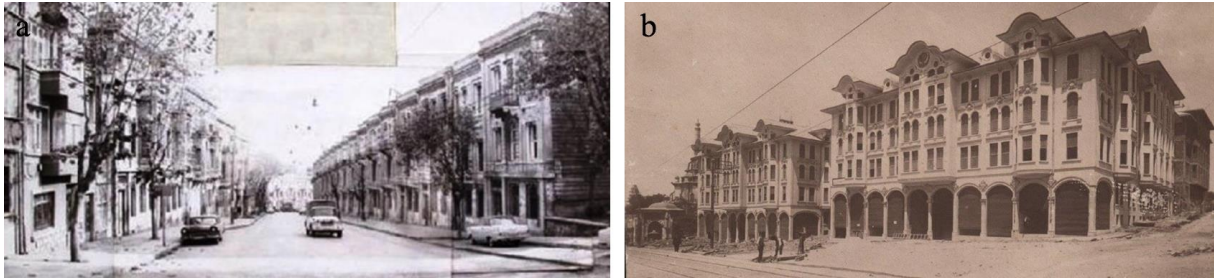
Şekil 5. İstanbul’da dar gelirlilere yönelik üretilen konutlar (Anonim, 2018).

### 3.1. Geç Osmanlı-Erken Cumhuriyet Dönemi (1900-1945)

Avrupa’da XIX. yüzyılda yaygınlaşan toplu konut/yaşam kültürünün Osmanlı’daki ilk örneğinin 1875 yılında Sultan Abdulaziz tarafından inşa ettirilen Akaretler sıraev grubu olduğu söylenebilir. Mimar Sarkis Balyan tarafından tasarlanan konutların sabit fonksiyonlu mekân tasarımının ilk örnekleri olduğu bilinmektedir. Yapılması planlanan Maçka Azizye Camii’ne gelir getirmesi amacıyla inşa edilen yapılar dönemin konut tipolojisinin önemli bir örneğidir. Geleneksel konut tipolojisinden farklı olan bu yapılar İstanbul’dan Anadolu kentlerine yayılmıştır (Sağdıç, 1999). 1918 yılında İstanbul’da meydana gelen ve geniş bir alana yayılan yangında birçok ev yanmış yangınzedeler evsiz kalmıştır. Yangınzedeler için 1918-1922 yılları arasında ise Harikzadegan apartmanları Mimar Kemalettin tarafından tasarlanmıştır (Kartal & Kartal, 2020). Bu iki örnek toplu



konut uygulamalarının ilk örnekleri olarak değerlendirilebilir (Şekil 6). Her iki örnek bir yandan Geç Osmanlı Dönemi modernleşme sürecini yansıtırken bir yanda da ülkenin politik, ekonomik ve sosyal yaşamının bir sembolü olarak görülebilir. Cumhuriyet’in kurulması ile birlikte Ankara başkent ilan edilmiş, kentte çalışacak bürokrat ve memurların konut sorunu ortaya çıkmıştır. 1925 yılında çıkarılan 586 sayılı yasa ile Ankara Yenışehir’de 198 konut inşa edilmiştir. 1930’lu yıllarda ise kooperatifler vasıtasıyla Bahçelievler, Güvenevler ve Kavaklıdere’de toplu konutlar üretilmiştir (Pulat, 1992; Türkoğlu, 2021). Aslında Ankara özelindeki yapılaşmanın Türkiye kentleri için bir prototip olduğu söylenebilir. Anadolu kentlerindeki konut yetersizliği, memurlara lojman yapılmasını gündeme getirmiştir. Ayrıca kooperatifler aracılığıyla konut kredileri çıkarılmıştır. Bu dönemde Türkiye İş Bankası tarafından Zonguldak’ta kurulan kömür işletmelerindeki işçiler için inşa edilen konutlar Seyfi Arkan tarafından projelendirilmiştir (Alkışer & Yürekli, 2004). Cumhuriyet’in ilanından 1930’lu yıllara kadar çok fazla konut üretilmemiş, mevcut konutlar kullanılmıştır. Bu aralıkta çoğunlukla Ankara’da bir konut üretimi söz konusu olsa da devletin aktif bir aktör olarak bu alanda yer alamadığı bilinmektedir (Sey, 1998). 1944-1946 yılları arasında ise Ankara’da Mimar Paul Bonatz tarafından Saraçoğlu Evleri mahalle anlayışı ile geleneksel Türk Evi dikkate alınarak tasarlanmıştır (Altnay & Naçakan, 2021). Bu yıllarda kamu çalışanları için Emlak Eytam Bankası, SSK vb. kurumların sağladığı destekler ve kurulan kooperatifler sayesinde devlet doğrudan ve dolaylı olarak konut üretiminde bulunmuştur. Özellikle Anadolu kentlerinde kurulan konut kooperatifleri sonraki yıllarda özel sektör tarafından farklı gelir grupları için konut üretmeye devam etmiştir (Tekeli, 1979). Cumhuriyetin kurulmasından 1950’li yıllara kadar geçen süreçte tek ev, apartman, işçi ve memur evleri ve kooperatifler aracılığıyla yapılan üretimlerden söz etmek mümkündür (Koca, 2015). Erken Cumhuriyet Dönemi’nde ortaya çıkan konut sorununun çözümü için devletin önemli adımlar attığı, az sayıda da olsa işlev ve konfor açısından nitelikli konutların üretildiği söylenebilir.



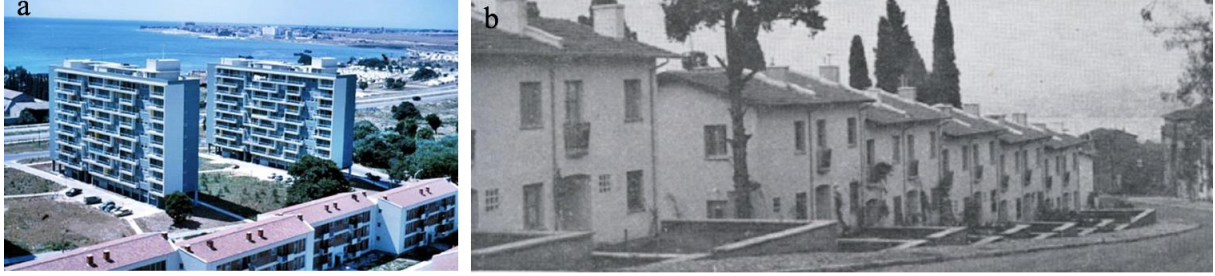
Şekil 6. a) Osmanlı’da ilk toplu konut akaretler sıraevler (Anonim, 2019), b) 1922 yılında tamamlanan harikzadegan (tayyare) apartmanları (Paşaoğlu, 2018)

### 3.2. 1950-1980 Dönemi

1950’ler Türkiye’inde kırdan kente iş bulmak amacıyla göçlerin başladığı yıllardır. Bu yıllara kadar alt gelir gruplarına yönelik konut üretimi olmadığı için sorunu daha belirgin bir hale gelmiştir. Bu dönemde kentlerin nüfusu hızla artarken duruma hazırlıksız yakalanan kentlerde konut sorunu, kaçak yapılaşma, gecekondulaşma ortaya çıkmıştır. Bu dönemde yaklaşık on yıllık bir süreçte (1950-1960) nüfusun %80.2 artarak plansız bir kentleşmeye sebep olduğu söylenebilir (Keleş, 1978). Tarımda makineleşme sonucu kırdaki işsiz kalanlar sanayiye çalışmak için büyük kentlere taşınmışlardır (Tuğaç, 2021). Kamunun yeterli derecede barınma imkanı sunamamış olması, göç edenlerin kent çeperlerine yerleşerek buralarda ilk gecekonduları meydana getirmelerine sebep olmuştur. Çoğunlukla iki katlı müstakil konutlar olarak inşa edilen yapılar, zaman içinde apartmanlara dönüşmüş ve 1965 yılında çıkarılan kat mülkiyeti kanunu ile sayıları hızlıca artmıştır (Keleş, 2013). Bu kanun apartmanların kooperatifler ile özel sektör tarafından üretilmelerine fırsat tanıyarak konut üretim ve sunum biçimini etkilemiştir. Merkezi ve yerel yönetimler bu çarpık kentleşmenin önüne geçememişlerdir. Çoğunlukla devlet arazilerine inşa edilen gecekondular 1966 yılında çıkarılan 775 sayılı Gecekondu Kanunu ile meşrulaştırılmıştır (Sey, 1998). 1960’lı yıllarda yürürlüğe giren yeni anayasa ile ‘planlı’ bir döneme geçilmiştir. 1969 yılında yürürlüğe giren Kooperatifler yasası ile konut kooperatifçiliği yaygınlaşmış ve yılda ortalama 140-150 kooperatif kurulmuştur. Bu dönemde devlet



konut sorununu çözmek için sınırlı sayıda konut üretmiş ve ucuz konutlara destek vermişse de sorun çözülememiştir. Bu dönemde Emlak Kredi Bankası tarafından ilk büyük ölçekli toplu konutlar olan Levent Mahallesi (1. Levent 1951, 2. Levent 1954, 3. Levent 1956, 4. Levent 1958, Levent 1961), 2. kısım 1953, 3. kısım 1954) Ataköy 1. kısım (1962), Ataköy 2. kısım (1964), ve Ataköy 3-4. kısım (1967), Koşuyolu Mahallesi (1. Kısım 1952, inşa edilmiştir (Türkoğlu, 2021) (Şekil 7).



Şekil 7. a) 1957-1962 Ataköy konutları b) Koşuyolu mahallesi (Şener & Yıldız, 2000)

### 3.3. 1980-2000 Dönemi

Bu dönemde neoliberal ekonomi politikaları konut politikalarını etkileyerek hızlı bir kentleşmeye sebep olmuştur. Kurulan büyükşehir belediyeleri ve imar hakkı konusundaki değişimler kentlerin yapı stokunu oldukça etkilemiştir. Yapılan yeni imar planları neticesinde kentsel dokudaki yeşil alan miktarı azalmış, önemli sivil mimari örneklerinin bir kısmı yıkılarak kentlerin çehresi değişmiştir (Tuğaç, 2021). Gecekondulaşmanın da bu dönemde yapısal bir soruna dönüştüğünden söz edilebilir (Özcan, 2007). 1984 tarihinde 2985 tarihli toplu konut yasası ile toplu konut üretimi teşvik edilmiştir. Aslında konut üretimi bağlamında toplu konut politikasının benimsenmesiyle yeni bir döneme geçildiği söylenebilir. Bu yıllarda atılan iki önemli adımdan ilki toplu konut kanununun çıkarılması ve kooperatifçiliğin desteklenmesi, ikincisi de Türkiye Emlak Bankası'nın işleyişine ilişkin yeni düzenlemelerin yapılmasıdır (Bayraktar, 2006). Bu dönemde alt ve orta gelir gruplarının konut sorununu çözmek için kurulan Toplu Konut İdaresi (TOKİ) günümüzde toplu konut üretiminde en önemli aktör olarak varlığını sürdürmektedir. Toplu Konut Yasasının sağladığı olanaklar ile ilk kez 60.000-75.000 kişiyi barındırma kapasitesine sahip Ataköy 5. Kısım (1982-1985), Ataköy 9. Kısım (1986) Ataköy 7.-8. kısım (1990), Halkalı (1992), Ataşehir (1990), Bahçeşehir (1986) gibi büyük ölçekli toplu konut projeleri üretilmiştir (Türkoğlu, 2021) (Şekil 8). Aynı dönemde gecekondu alanlarının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar da yürütülmüş ancak yapılan çalışmalar neticesinde bu alanların planlanmasının ötesinde yasal hale getirilerek yoğunluklarının artırıldığı izlenmektedir. 1990'lı yıllarla birlikte toplu konut üretiminde özel sektörün de önemli bir rol üstlendiği izlenmektedir (Koca, 2015). TOKİ'nin bu yıllarda özel sektörle iş birliği içinde çok sayıda konut ürettiği ancak bu konutların orta ve yüksek gelir gruplarına hitap ettiği, düşük gelirli için üretilen konutların ise yetersiz kaldığı bu sebeple gecekondulaşmanın devam ettiği görülmektedir. Devletin 1980'li yıllardan sonra özel sektörü desteklediği, yerel yönetimlerin yetkilerini genişlettiği bilinmektedir. Bu durum kentlerin parçalı planlanmasının önünü açarak, kentin bazı bölgelerinde farklı yapılaşmalara olanak sağlamıştır (Koca, 2015).



Şekil 8. a) Sinanoba konutları (Eryıldız, 1995), b) Ataköy konutları (Anonim, 2002).

### 3.4. 2000 Sonrası Dönem

Türkiye’de 1950’li yıllardan beri sürdürülen konut politikaları farklı iş kollarındaki sermayenin arttırılması ve ekonomik krizlerin aşılmasında konut üretimini bir araç olarak görmüştür (Kara & Palabıyık, 2009). 1999 Marmara depremi’nin ardından mevcut yapı stokunun yenilenmesi gerektiği düşüncesi önem kazanmış kentsel dönüşüm üzerinden bir çalışma başlatılmıştır. Bu aşamada TOKİ’nin çalışmaları gündeme gelmiştir. 1984 yılında kurulan ve 2000’li yılların başına kadar binlerce konutun üretilmesini ve desteklenmesini sağlayan TOKİ’nin zamanla piyasaya yönelik bir üretim gerçekleştirdiği bilinmektedir. TOKİ, Türkiye genelinde konut üretim biçimi ve kentsel dönüşüm projeleri ile kentsel değişim ve dönüşümün öncüsü olmuştur. 2000’li yılların başından itibaren merkezi hükümet tarafından verilen geniş yetkilerle TOKİ’nin kamu arazilerine özel sektörle iş birliği içinde toplu konutlar inşa ettiği, belediye ve kooperatiflere de finansman desteği sağladığı bilinmektedir. 2000’li yılların başında çıkarılan 5393 sayılı Belediye Kanunu, 5366 sayılı Yıpranan Tarihi ve Kültürel Taşınmaz Varlıklarının Yenilenerek Korunması ve Yaşatılarak Korunması Hakkındaki Kanun, 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkındaki Kanun konut üretimi konusunda önemli değişimlere sebep olmuştur (Keleş, 2013). TOKİ’nin bu yıllarda başladığı hızlı konut üretimi 2020’li yıllarda ülke genelinde sayıları yüzbinleri bulan yüksek katlı ve yüksek yoğunluklu toplu konut projeleri ile devam etmiştir. Bu dönemde de TOKİ tarafından üretilen konutların genellikle uygun olmayan alanlarda (yerleşime elverişli olmayan alanlar ve kentsel yerleşime uzak alanlar: Van Kenti TOKİ konutları örneğinde olduğu gibi) orta ve yüksek gelirlere yönelik olduğu görülmektedir (Gülen, 2019). Türkiye genelinde tek tip olarak üretilen bu konutlar tüm donatıları bünyesinde barındıran kapalı siteler olarak hala üretilmeye devam etmektedir (Şekil 9). Aslında TOKİ’nin amacı zaten çok sayıda konut üretmek bu sebeple çoğunlukla kent dışındaki geniş araziler tercih edilmektedir. Bu arazilerin imar planlarının uygunluğuna bakılmadan, kent ve çevre politikalarına dikkat edilmeden çok sayıda konut üretilmektedir (Tekeli, 2008).



Şekil 9. a) Bursa TOKİ konutları (Anonim, 2017), b) Van TOKİ konutları (Gülen, 2019).

#### 4. Türkiye’de Toplu Konut Üretiminde Etkin Olan Aktörler, Finansman ve Örgütlenme Türleri

Türkiye’de yaşanan hızlı kentleşme, nüfus artışı vb. gelişmeler konut açığına sebep olmuştur. Konut sorunuyla karşıya kalan halk çoğu zaman sorunu kendi yöntemleriyle kamu arazilerine gecekondular yaparak çözüme yoluna gitmiştir. Devletin bu sorunu çözmek için başvurduğu yöntemlerden birisi ise toplu konuttur. Türkiye’de toplu konut üretiminde farklı aktörler farklı finansman ve örgütlenme modelleri geliştirerek soruna çözüm üretmeye çalışmışlardır. Bunları belediyeler, Toplu Konut İdaresi, İmar ve İskan Bakanlığı (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı), yapı kooperatifleri ve birlikleri, Emlak Bankası, özel toplu konut şirketleri olarak sıralamak mümkündür. Bu aktörlerin, finansman ve örgütlenme türlerinin konut üretiminin planlama, tasarım ve yapım süreçlerini biçimlendirdiği bilinmektedir.

##### 4.1. Belediyeler

Türkiye’de konut sorunun çözümünde yer alan aktörlerden birisi de belediyelerdir. 1930 tarihli Belediye Yasası, ucuz konut yaparak konut sorunun giderilmesi hususunda belediyelere bazı yetkiler vermektedir. Ancak konut üretimi konusunda yetki ve sorumluluğun büyük oranda merkezi idarede olduğu görülmektedir (Turan, 1993). Tıpkı merkezi yönetimler gibi belediyelerin de bu sorun karşısında yeterli ve kalıcı bir çözüm üretmedikleri görülmektedir. Bunun bir sebebi olarak belediyelerin idari, mali ve hukuki konularda yaşadıkları önemli sorunlar gösterilebilir. Ancak Türkiye’de zaman zaman bazı belediyelerin konut kooperatifleri ile iş birliği yaparak sorunun çözümünü için önemli adımlar attığı bilinmektedir. Özellikle 1970’li yıllarda sosyal demokrat belediyelerin konut ve arsa üretimine önem verdikleri görülmektedir. Bu bağlamda Ankara büyükşehir belediyesi tarafından 1973 yılında Ankara-İstanbul karayolunun kuzeyinde gerçekleştirilen Batıkent projesi dikkate değerdir. Vedat Dalokay’ın belediye başkanlığı döneminde başlayan proje toplu konut üretiminde yeni yapım teknolojileri ve mevcut toplu konut üretimlerinden farklı bir öneri sunmuştur (Şekil 10). Ayrıca proje katılımcı ve demokratik süreçleri bağlamında da diğer toplu konut uygulamalarından farklılaşmaktadır (Gülen, 2019). Ne yazık ki yapılan uygulamaların sürekliliği sağlanamamış yaşanan ekonomik ve siyasi krizler sonucunda belediyeler bu alandan çekilmiştir.



Şekil 10. Batıkent Nazım İmar Planı (Baysal, 2015).



## 4.2. Toplu konut idaresi (TOKİ)

Türkiye’de toplu konut üretiminde en önde gelen kurumlardan birisi olan TOKİ, 1984 yılında 2985 sayılı yasa ile konut ihtiyacının karşılanması, konut üretiminde uyulacak usul ve esasların belirlenmesi ve Türkiye’de konut üretiminde uygun inşaat araç ve gereçlerin desteklenmesi için kurulmuştur. 2000’li yıllara gelindiğinde 4966 sayılı kanun ile TOKİ’ye şirket kurma, şirketlere ortak olma, yurtiçi ve yurtdışı iştirakleri aracılığıyla doğrudan ve dolaylı olarak konut üretmek, kaynak sağlamak ve kâr amaçlı projeler geliştirme yetkisi verilmiştir. 2004 tarihli 5273 sayılı kanun ise Arsa Ofisi Genel Müdürlüğü’nün görev ve yetkilerinin TOKİ’ye devredilmesine imkân tanımıştır (Anonim, 2021). 2003 yılında çıkarılan ‘Bazı Kanunlarda ve Bayındırlık ve İskân Bakanlığı’nın Teşkilat ve Görevleri hakkında kanun Hükmünde kararnamede değişiklik yapılması hakkında kanun’ ile geniş ve ayrıcalıklı yetkilerle donatılan kurum, konut sektörü ile ilişkili şirketler kurarak bir inşaat firması gibi faaliyet göstermektedir (Yolcu, 2021). TOKİ, 2018 yılı itibariyle kamu arazilerine kamu ve özel sektör iş birliğiyle yüksek katlı, yoğunluklu 700 bin konut inşa etmiş ve hala üretmeye de devam etmektedir. Düşük gelir gruplarına yönelik konut üretmek maksadıyla kurulan TOKİ’nin 2000’li yıllardan sonra bu amacından uzaklaştığı söylenebilir. Bugün gelinen noktada TOKİ’nin her ne kadar 2023 yılı hedefleri arasında 1 milyon konut üretmek gibi bir amacı söz konusu ise de günümüzde alt gelir grupları ve ihtiyaç sahipleri için yeterli sayıda ve ulaşılabilir konut üret(e)mediği söylenebilir (Akalm, 2016). Türkiye’nin hemen hemen tüm illerinde TOKİ tarafından yapılan konutlarla karşılaşmak mümkündür. Tip proje olarak üretilen konutlar çoğu zaman hem kullanıcıları hem de çevre sakinleri tarafından eleştirilere maruz kalmaktadır. Bu toplu konutların en dikkat çeken Bursa Doğanbey’de 2011 yılında inşa edilen toplu konutlardır. Kentin yıllar içinde oluşmuş dokusunda ve silüetinde bıraktığı iz tartışmalara sebep olmuştur (Şekil 11).



Şekil 11. TOKİ tarafından Bursa Doğanbey’de inşa edilen toplu konutlar (Anonim, 2023a).

## 4.3. Yapı kooperatifleri ve birlikleri

Konut sorununun çözümünde yer alan bir diğer önemli aktör kooperatifler ve birliklerdir. Kooperatifler alt gelir gruplarının birikimlerini değerlendirmek ve toplumsal dayanışmayı arttırmak

amacıyla kurulmuşlardır. Dar ve sabit gelirli için konut üretiminde önemli bir oluşum olan kooperatiflerin de yaşanan ekonomik bunalımdan etkilendiği ve varoluş amacının dışına çıkarak üst gelir gruplarının istek ve talepleri doğrultusunda üretimler gerçekleştirdikleri izlenmektedir (Koç, 2022). Yapı kooperatiflerinin etkinliğini iki döneme ayırmak mümkündür. İlki 1930’lu yıllarda Ankara’da başlayan ve 1950’li yıllara kadar tüm Türkiye’ye yayılan süreçtir. Ankara’da üst kademe bürokratlar için üretilen Bahçelievler Yapı Kooperatifi bunun örneği olarak ele alınabilir. İkincisi ise 1960’lar sonrası yaşanan planlı dönemdir. Kat mülkiyet yasasının çıkması, sosyal sigortalar konut fonunu konut kooperatiflerine dağıtmaya başlamıştır. Bu sayede bir apartmanın daire sayısı kadar kişinin konut sahibi olmasına imkân tanınmıştır. Bu konut sunum biçiminin en büyük handikabı toplumun sadece örgütlü işlerinde çalışanları kapsamasıdır (Tekeli, 2010). Toplumun tümüne ya da büyük bir kısmına imkân tanımadığı için özellikle alt ve orta gelir grupları tarafından çok fazla tercih edilmemiştir. Kooperatifler, toplu konut üretimindeki diğer aktörlere göre kullanıcıya sınırlı da olsa bir seçme hakkı tanıdığı için katılımcı süreçlerin ilk prototiplerinden birisi olarak da yorumlanabilir. Yapı Kooperatiflerinin önemli bir örneği Ege-Koop’tur. 1984 yılında Ege Bölgesi’nde kurulan ilk kooperatif birliği dört yıllık süreçte Egekent 1 projesi ile 8548 konut inşa etmiştir (Şekil 12). Ege Koop. öncelikle toplu konut yapılacak arsayı satın alarak imar ve proje işlemlerini çözüyor. Daha sonra örgütlenmeye geçerek üye kayıtlarını alıyor. Bu aşamalardan başlayarak üretim aşamasına ve konutların teslimine kadar tüm süreçlerde denetime önem verilmektedir (Eryıldız, 1995).



Şekil 12. Egekent 1 Projesi, İzmir Çiğli (Anonim, 2023b).

#### 4.4. Özel toplu konut şirketleri

Konut sorununun çözümünde yer alan organizasyonlardan birisi de özel toplu konut şirketleridir. Türkiye’de özel sektörün konut üretiminde önemli bir belirleyici olduğu bilinmektedir. Ve fakat özel sektör konut sorunu yaşayan alt ve orta gelir gruplarından çok üst gelir grupların konut ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Bu da sorunun daha da derinleşmesine sebep olmaktadır. Toplu konut şirketlerinin toplu konut üretim modeli, yapsatçı üretim modeline göre daha kapsamlı ve karmaşıktır. Büyük bir girişimci ve kapsamlı bir iş söz konusudur. Şirket sermayesi başlanan işin yatırım hacminden küçüktür bu sebeple konut alıcılarının birikimlerinin ve aldıkları kredilerin iş programına uygun bir şekilde aktarılması gerekmektedir (Tekeli, 2010). Türkiye’de toplu konut üretimi yapan birçok özel şirketten söz etmek mümkündür. Bu şirketlerin en önemlilerinden birisi de Soyak Şirketler Grubudur. 1961 yılında kurulan şirketin en önemli toplu konut projesi 1985 yılında inşasına başlanan ve 1992 yılında tamamlanan Soyak Göztepe Projesi’dir (Şekil 13).





Şekil 13. Soyak Göztepe toplu konut projesi (Anonim, 2023c).

#### 4.5. Emlak Bankası

Erken Cumhuriyet Döneminde konut sorununun çözümü ve yeni kurulan ülkenin imarına hizmet etmek için 1926 yılında Emlak ve Eytam ismi ile kurulmuştur. Kurulduğu tarihten günümüze kadar farklı isimler altında inşaat alanındaki farklı işbirlikleri ile birçok konut projesinde yer almıştır. Türkiye’de toplu konut projelerinin önemli örnekleri olan Bahçelievler konutları, Saraçoğlu Mahallesi, Levent Konutları, Koşuyolu Mahallesi vb. birçok proje ile konut kredisi finansman modelinin hayata geçmesinde önemli bir rol oynamıştır (Türkoğlu, 2021). Bu projeler arasında Ankara’da Saraçoğlu Mahallesi, 450 konutluk kapasitesi ile Cumhuriyet tarihinin ilk büyük toplu konut projesidir. Mülkiyeti kamuda olan bu konutlar üst düzey bürokratlara kiraya verilmiştir (Keleş, 2013). Proje, Emlak Bank Yapı Ltd. Şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir. 1953 yılında ise İstanbul’da Levent Projesiyle 1950 konutun üretimi gerçekleştirilmiştir. İstanbul Çatalca’da gerçekleştirilen Batıköy toplu konut projesi de önemli projeleri arasında yer almaktadır (Şekil 14). Kurulduğu tarihten 1988 yılına kadar Türkiye genelinde binlerce konutun inşa edilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Türkiye’de konut sorununun çözümü ve kentleşme tarihinde önemli bir rol oynayan Emlak Kredi’nin bankacılık faaliyetleri sonlandırılarak gayrimenkulleri TOKİ’ye devredilmiştir (Aydın, 2019).



Şekil 14. Batıköy toplu konut projesi (Eryıldız, 1995).

Çizelge 1. Türkiye’de yıllara göre konut üretimi ile ilgili meydana gelen gelişmeler

Yıl	Konut Üretimi
1861-1876	Sultan Abdülaziz tarafından saray hizmetlilerinin kullanımı için ilk toplu konut uygulaması Beşiktaş, Akaretler’de yapılmıştır
1921	1918 yangınından zarar görenler için Laleli’de inşa edilen Harikzedegan (Tayyare) Apartmanları da ilk betonarme toplu konut uygulaması olarak değerlendirilebilir
1925-1934	Kamu kuruluşları tarafından devlet çalışanları için konut üretimi gerçekleştirilmiştir
1926	Emlak ve Eytam Bankası kurulmuş, memurların ve talep sahiplerinin konut kredisi alabilmeleri sağlanmıştır.
1940’lar	Emlak Eytam Bankası’nın devlet çalışanları için lojman yapımını desteklemesi sağlanmıştır
1944	Memur Meskenleri İnşası Hakkında Kanun ile konut yapılması konusu düzenlenmiştir
1945	SSK kooperatifleşme koşulu ile konut kredisi vermeye başlamıştır
1948	İki ayrı yasa ile belediyelerin konut sorunuyla ilgilenmelerini sağlayacak hükümler içermektedir
1950’ler	Özel sektör yatırımcısı tarafından kooperatifler vasıtasıyla konut üretimi gerçekleşmiştir
1953	6188 sayılı “Bina Yapımını Teşvik Kanunu” yasa ile apartmanlaşmayı yaygınlaştırmıştır
1965	Kat Mülkiyeti Kanunu ile apartmanların kooperatiflerce ya da özel sektör girişimcisi tarafından üretimi kanun ile yaygınlaşmaya başlamıştır
1966	775 sayılı Gecekondu Kanunu ile gecekondu meşrulaştırılmıştır
1969	Kooperatifler Kanunu ile de yap-sat yöntemine benzer şekilde kent çeperlerinde arsa satın alan özel sektör yatırımcısı, kooperatifleşme yolu ile konut üretmeye devam etmiştir
1970’ler	Özel sektör yatırımcısı tarafından kurulan kooperatifler vasıtasıyla gerçekleştirilen apartman üretimi belediyeler tarafından devam etmiştir
1981-1984	2487 sayılı toplu konut kanunu ve 2985 sayılı toplu konut kanunu çıkarılmış ve bu kanunu yürütecek olan Toplu Konut İdaresi’nin kurulması ile devlet konut projelerinin yapımını örgütlemeye başlamıştır
1984	2981 sayılı İmar Affı Kanunu ile toplu konut uygulamalarının yaygınlaşması hızlanmıştır
1985	İmar Kanunu ile yerel yönetimlerin yetkilerinde değişimler olmuş, imar planlama kararları alma, onay ve denetim belediyeler yetkisine bırakılmıştır
1990	Toplu Konut İdaresi kurumundan Kamu ortaklığı kısmı ayrılarak idare tek başına daha özerk bir hale getirilmiştir
1993	Toplu Konut Fonu genel bütçeye bağlanmış, 2001 yılında tamamen yürürlükten kaldırılmıştır
2004	TOKİ, Arsa Ofisi’nden devrolan ya da idareye tahsis edilen kamu arazilerinin ya da kentsel dönüşüm yolu ile kent parçaları üzerinde yerel yönetimler, özel sektör yatırımcısı veya her iki aktörün bir araya geldiği ortaklıklar ile beraber çalışarak toplu konut projeleri üreten ve kentsel planlama yapan bir kurum haline gelmiştir

## 5. Tartışma ve Sonuç

Barınma ihtiyacı İnsan Hakları Evrensel Bildirgesi’nde yer alan en temel haklardan birisidir. Devletler, vatandaşlarının barınma ihtiyacını karşılayacak politikalar geliştirmek ve konut sorunlarına çözüm üretmekle yükümlüdürler. Türkiye’de 1950’li yıllarda yaşanan hızlı kentleşme sonucu konut sorunu belirgin olarak hissedilmeye başlanmıştır. Bu dönemde kaçak yapılaşma ve gecekondulaşma ile plansız büyüyen kentler ortaya çıkmıştır. Gecekondu sosyal ve ekonomik sistemin bir sonucu

olarak konut sorununun önemli bir parçasıdır. Vatandaşların kendi çabalarıyla inşa ettikleri gecekondular dönemin hükümetleri tarafından çıkarılan imar aflarıyla meşru bir hale getirilmiştir. 1950 ve öncesinde çoğunlukla bireysel olarak inşa edilen konutlar, 1960’lı yıllardan başlayarak kitlesel olarak üretilmiş ve kar elde etmek üzerine kurgulanmıştır. 1980’li yıllarda konut üretimi kentleşmeye paralel olarak artmışsa da 1999 yılında yaşanan Marmara depremi üretimin azalmasına sebep olmuştur. Tüm bu süreçlerde devletin hiçbir dönemde konut sorununun çözümüne yönelik kalıcı bir politika geliştiremediği de aşikardır. Toplu konut üretimi Türkiye’de Geç Osmanlı’dan başlayan ve Cumhuriyetin kurulması ile birlikte günümüze kadar devam eden konut sorununa bir çözüm modeli olarak her dönem gündeme gelmiştir. Erken Cumhuriyet Döneminde Ankara’da bürokratlara yönelik yapılan toplu konutlar, 1950’li yıllarda ülkenin farklı kentlerinde işçi ve memurlara yönelik yapılan uygulamalarla devam etmiştir. Toplu konut üretimi Emlak Bankası, Toplu konut idaresi, belediyeler, kooperatifler ve özel şirketler tarafından üretilmiştir. Toplu konut üretiminde yer alan farklı aktörlerin iş birliği önemliken bu ilişkilerin kurulmadığı ya da yetersiz kaldığı bilinmektedir. 1980’li yıllarda özel şirketlerle yapılan iş birlikleri neticesinde üst gelir gruplarına yönelik toplu konut üretimleri devam etmiştir. 2000’li yıllardan sonra TOKİ tarafından tüm Türkiye’de üretilen toplu konutlar başta kullanıcılar olmak üzere toplumun farklı birçok kesimi tarafında eleştirisi konusu olmuştur. Toplu konut meselesi sadece konut sayısına indirgenemeyecek kadar karmaşık sosyal, kültürel ve ekonomik yönleri olan bir olgudur. Toplu konutlar, toplumun tüm kesimlerinin yaşam biçimlerini ve çevrelerini doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen bir olgu olarak niceliğinin ötesinde niteliği ve kentsel çevrede meydana getirdiği değişim ve dönüşüm bağlamında ele alınması gereken yapılarıdır.

## Kaynakça

- Akalın, M. (2016). Sosyal konutların Türkiye’nin konut politikaları içerisindeki yeri ve tokinin sosyal konut uygulamaları. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 26(1), 107-123.
- Alkan, L., & Uğurlar, A. (2015). *Türkiye’de konut sorunu ve konut politikaları* (Rapor No. 1). Ankara, Türkiye: Kent Araştırmaları Enstitüsü.
- Alkışer, Y., & Yürekli, H. (2004). Türkiye’de “devlet konutu”nun dünü, bugünü, yarını. *İTÜ Dergisi/a Mimarlık, Planlama, Tasarım*, 3(1), 63-74.
- Altınay, A., & Naççakan, M. (2021). Kişisel tanıklıklar bağlamında mekansal okumalar ve değerlendirmeler: Bir bellek mekânı olarak Ankara Saraçoğlu mahallesi. *Ankara Araştırmalar dergisi*, 9(1), 1-34. doi:10.5505/jas.2021.54210
- Anonim. (2002). Ataköy 9.10 kısım. [https://tr.wikipedia.org/wiki/Atak%C3%B6y,\\_Bak%C4%B1rk%C3%B6y#/media/Dosya:Atak%C3%B6y\\_9.10\\_k%C4%B1s%C4%B1m\\_-\\_panoramio.jpg](https://tr.wikipedia.org/wiki/Atak%C3%B6y,_Bak%C4%B1rk%C3%B6y#/media/Dosya:Atak%C3%B6y_9.10_k%C4%B1s%C4%B1m_-_panoramio.jpg) Erişim Tarihi: 13 Kasım 2021.
- Anonim. (2017). Toki Van’da 250 konut inşa edecek! <https://www.yeniemlak.com/toki-vanda-250-konut-insa-edecek-13618-toki> Erişim Tarihi: 8 Aralık 2021.
- Anonim. (2018). İstanbul’da dar gelirliye konut satışı devam ediyor. <https://istanbultokikonutlari.com/istanbulda-dar-gelirliye-konut-satisi-devam-ediyor.html> Erişim Tarihi : 09.04.2022.
- Anonim. (2019). Osmanlı’nın ilk toplu konut projesi. <https://www.insaatderyasi.com/osmanlinin-ilk-toplu-konut-projesi-11961h.htm> Erişim Tarihi: 11.05.2021.
- Anonim. (2021). Toplu konutlar. *Kentli Dergisi*, 42, 53-57.
- Anonim. (2023a). Bursa depreme hazırlanıyor. <https://www.bursamuhalif.com/bursa-depreme-hazirlaniyor/> Erişim Tarihi: 10.08.2023.
- Anonim. (2023b). Tamamlanan projeler. <https://www.egekoop.org.tr/tamamlanan-projeler> Erişim Tarihi: 16.05.2022.
- Anonim. (2023c). Soyak Göztepe projesi. <https://www.soyak.com.tr/soyak-goztepe/> Erişim Tarihi: 19.05.2021.
- Aydın, S. (2019). Konut sorununa devletin müdahale aracı olarak Emlak Bankası. *Eğitim Bilim Toplum Dergisi*, 17(66), 74-107.
- Bakar, S. & Yamaçlı, R. (2017). İşçi evlerinin tarihsel gelişimi bağlamında Eskişehir Tülomsaş İşçi Evleri üzerinden bir değerlendirme. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 34-49.

- Batuman, B. (2022). Ev sahipliği arzusunun sömürüsü üzerine inşa edilen TOKİ konutları. <https://www.gazeteduvar.com.tr/ev-sahipligi-arzusunun-somurusu-uzerine-insa-edilen-toki-konutlari-makale-1582029> Erişim Tarihi: 17 Ocak 2023.
- Bayraktar, E. (2006). *Gecekondu ve kentsel yenileme*. Ankara, Türkiye: Ekonomik Araştırmalar Merkezi Yayını.
- Baysal, M. (2015). *Ankara’da apartmanlar ve kapalı-güvenlikli toplu konutlar mekânsal konfigürasyonu sentaktik analizi*. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Bilgin, İ. (1998). Toplu konut mimarisi ve ATK lojmanları. *Arredamento Mimarlık*, 108, 86-93.
- Bingöl, Ö. (2015). Mimari bir tipoloji olarak toplu konut. <https://xxi.com.tr/i/mimari-bir-tipoloji-olarak-toplu-konut> Erişim Tarihi: 12.03.2022.
- Clemente, C., & De Matteis, F. (2010). *Housing for Europe: Strategies for quality in urban space, excellence in design, performance in building*. Roma, Italy: Tipografia del Genio Civile.
- Corbusier, L. (1999). Bir mimarlığa doğru. *İstanbul, Türkiye: Yapı Kredi Kültür Sanat Yayınları*.
- Çoban, N. A. (2012). Cumhuriyet’in ilanından günümüze konut politikası, *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 67(3), 75-108. doi:10.1501/SBFder\_0000002256
- Demirtaş, E. (2020). Hem pahalı hem güvensiz. *Gazete Kadıkoy* <https://gazetekadikoy.com.tr/gundem/hem-pahali-hem-gvensiz> Erişim Tarihi: 12.05.2022.
- Düzenli, H. İ., & Düzenli, E. (2019). 100 yıl önce - 100 yıl sonra Mardin: Birinci cadde ve halkevi binası üzerinden bir modern kent okuması. *Megaron*, 14(1), 103-121. doi:10.5505/MEGARON.2018.46704
- Engels, F. (1992). *Konut sorunu*. Çev. Tekin Genç, Ankara, Türkiye: Alter Yayıncılık.
- Eryıldız, S. (1995). “Konut sorunu” ve toplu konut “çözümleri”. *Mimarlık Dergisi*, 261, 18-36.
- Güldehan Atay, F. (2011). *Mimari üretimde kullanıcının yeri*. (Doktora Tezi), Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Gülen, M. (2019). *Dar gelirliler için toplu konut üretiminde mimari tasarım süreci ve kullanıcının rolü üzerine bir model önerisi Van kenti örneği*. (Doktora Tezi), Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Gülen Türker, S. (2021). Modern Türk mimarlığında dönemsel bir tasarım deseni incelemesi: Ankara İsrail evleri (1955-1960). *Kentli Dergisi*, 42, 77-82.
- Hasol, D. (1995). *Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü*. İstanbul, Türkiye: YEM Yayınları.
- Kara, M., & Palabıyık, H. (2009, Eylül). *1980 sonrası Türkiye’de konut politikaları: Toplu konut idaresi başkanlığı (TOKİ) gecekondu dönüşüm uygulamaları*. Uluslararası Davraz Kongresi, Isparta.
- Karasu, M. A. (2005). Türkiye’de konut sorununun çözümünde farklı bir yaklaşım; belediye-toplu konut idaresi-konut kooperatifleri işbirliği modeli. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 1, 56-87.
- Kartal, H. B., & Kartal, A. N. (2020). Mimar kemaleddin ve harikzedegan (tayyare) apartmanları üzerine bir deneme. *Hars Akademi Uluslararası Hakemli Kültür Sanat Mimarlık Dergisi*, 3(6), 318-341.
- Keleş, R. Y. (1966). Sosyal konut politikası kavramı üzerinde bir deneme ve Türkiye’de sosyal konut politikası. *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 21(2), 167-234. doi:10.1501/SBFder\_0000000440
- Keleş, R. (1978). Konut Sorunları ve Politikası. In F. Yavuz, R. Keleş, & C. Geray (Eds.), *Şehircilik* (pp. 587-721). Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi.
- Keleş, R. (2007). İnsan Hakkı Olarak Barınma Hakkı ve Kentsel Dönüşüm. In B. Ceylan-Ataman (Ed.), *Cahit Talas Anısına: Güncel Sosyal Politika Tartışmaları* (pp. 429-443), Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Yayınları.
- Keleş, R. (2013). *Kentleşme Politikası*. Ankara: İmge Kitapevi.
- Koca, D. (2015). Türkiye’de çağdaş konut üretiminin yeniden okunması. *Tasarım ve Kuram*, 11(19), 19-36.
- Koç, H. (2022). Kentsel konut sunumunda giderek unutulmuş bir organizasyon: Konut yapı kooperatifleri. *İdealkent*, 13(37), 2002-2026. doi:10.31198/idealkent.1117042
- Koyuncu, P. (2011). Modern mimarlığın öldüğü gün. <https://www.arkitera.com/haber/modern-mimarligin-oldugu-gun/> Erişim Tarihi: 12.05.2021.



- Kömürlü, R. (2006). *Ülkemizde toplu konut üretimine yönelik kaynak oluşturma model yaklaşımları*. (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Özcan, Z. (2007). Anadolu konut yerleşim deseninde ikili oluşum Ankara Batıkent- Ergazi örneği. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 295-306.
- Paşaoğlu, A. (2018). Paranın üzerindeki mimardan: Tayyare apartmanları. <https://www.art-his.com/paranın-uzerindeki-mimardan-tayyare-apartmanlari/> Erişim Tarihi 10 Mayıs 2021.
- Pulat, G. (1992). *Dar Gelirli Kentlilerin Konut Sorunu ve Soruna Sosyal İçerikli Mekansal Çözüm Arayışları*. Ankara: Kent-Koop Yayınları.<sup>[1]</sup>
- Sağdıç, Z. (1999). *Sıraev kavramının incelenmesi ve Osmanlı mimarisinde Akaretler sıraev grubunun yeri ve önemi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Sey, Y. (Ed.). (1998). Cumhuriyet Döneminde Konut. In *75 Yılda Değişen Kent ve Mimarlık* (pp. 273-300). İstanbul: Tarih Vakfı Yurt Yayınları.
- Sönmez, B. (1979). Konut sorunu ve yeni yerleşmeler. *Mimarlık Dergisi*, 160, 11-12.
- Şener, H., & Yıldız, D. (2000). Dünden bugüne koşuyolu. *Mimarlık*, 291, 26-37.
- Tekeli, D. (2008). TOKİ projelerinde mimariyi etkileyen kurallar. In M. S. Işık (Ed.), *Anadolu’da Konut ve TOKİ Mimarlığı, Teknik İnceleme, Panel-Forum, 8-9 Ağustos 2008* (pp. 54-58). TMMOB Mimarlar Odası Konya Şubesi.
- Tekeli, İ. (1979). Türkiye kentlerinde apartmanlaşma sürecinde iki aşama. *Çevre Mimarlık ve Görsel Sanatlar Dergisi*, 4, 79.
- Tekeli, İ. (2010). *Konut Sorununu Konut Sunum Biçimleriyle Düşünmek*. İstanbul, Türkiye: Tarih Vakfı Yurt Yayınları.
- Tuğaç, Ç. (2021). Tarihsel gelişim süreci içinde Anadolu’daki yerleşimler ve konut tipolojileri üzerine bir değerlendirme. *Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 6(1), 223-248. doi:10.26835/my.892537
- Turan, N. (1993). Konut sorununun çözümünde belediye, kooperatif ve toplu konut idaresi’nin rolü. *Anadolu Üniversitesi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(1), 45-57.
- Türkoğlu, H. (2021). Türkiye’de konut ve toplu konut üretimi. *Kentli Dergisi*, 42, 58-64.
- Yolcu, F. (2021). Türkiye’de kentsel dönüşümün yasalar ve aktörler üzerinden dönemsel olarak değerlendirilmesi. *Planlama*, 31(3), 393-401. doi:10.14744/planlama.2021.46504





## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Derleme Makale

### Süt ve Süt Ürünlerinde Kekik ve Kekik Uçucu Yağlarının Kullanımı

Nihal YAMAN<sup>\*1</sup>, Semih ÖTLEŞ<sup>2</sup>, Özgül ÖZDESTAN OCAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü, 35660, İzmir Türkiye

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 35040, İzmir, Türkiye

Nihal YAMAN, ORCID No: 0000-0002-2264-6107, Semih ÖTLEŞ, ORCID No: 0000-0003-4571-8764, Özgül ÖZDESTAN OCAK, ORCID No: 0000-0003-0967-8865

\*Sorumlu yazar e-posta: nihal.yaman@tarimorman.gov.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 02.11.2022  
Kabul: 02.03.2023  
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1198519

#### Anahtar Kelimeler

Antimikrobiyal,  
Antioksidan,  
Kekik,  
Süt ürünleri,  
Süt,  
Uçucu yağ

**Öz:** Süt ve süt ürünleri hem mikrobiyolojik bozulmalara, hem de yapısında lipid ve türevlerinin oldukça zengin bulunması nedeniyle lipid oksidasyonuna maruz kalabilmektedir. Süt ve süt ürünlerinde ürün raf ömrünü uzatmak, gıda güvenliğini sağlamak ve duyu kaliteyi geliştirmek amacıyla sentetik koruyucular yerine doğal koruyucular kullanılması, üretici talepleri ve tüketicilerin eğilimleri ile tercih edilmeye başlanmıştır. Uçucu yağların ve aktif bileşenlerinin antimikrobiyal ve antioksidan aktiviteleri hakkında birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak süt ve süt ürünleri için uçucu yağların veya bunların kombinasyonlarının etki mekanizmaları hakkında kapsamlı çalışmalar yapılmamıştır. Bu derleme ile, Türkiye’de çeşitliliği fazla olan tıbbi aromatik bitkiler arasında bulunan kekik bitkisinin, elde edilen kekik uçucu yağlarının ve diğer uçucu yağlarla oluşturulmuş kombinasyonlarının süt ve süt ürünlerinde işlevleri ile ilgili mevcut çalışmalar anlatılacaktır.

### Use of Thyme and Thyme Essential Oils in Milk and Dairy Products

#### Article Info

Received: 02.11.2022  
Accepted: 02.03.2023  
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1198519

#### Keywords

Antimicrobial,  
Antioxidant,  
Dairy products,  
Essential oil,  
Milk,  
Thyme

**Abstract:** Milk and dairy products can be exposed to both microbiological deterioration and lipid oxidation due to the rich presence of lipids and derivatives in their structure. The use of natural preservatives instead of synthetic preservatives in milk and dairy products to extend the shelf life of the product, ensure food safety and improve sensory quality has started to be preferred due to the demands of the producers and the tendencies of the consumers. There are many studies on the antimicrobial and antioxidant activities of essential oils and their active ingredients. However, extensive studies on the mechanisms of action of essential oils for milk and dairy products or their combinations have not been conducted. In this review, the current studies on the functions of the thyme plant, which is among the medicinal aromatic plants with high diversity in Türkiye, the obtained thyme essential oils and their combinations formed with other essential oils in milk and dairy products will be evaluated.

## 1. Giriş

Süt ve süt ürünlerinde pastörizasyon ve sterilizasyon gibi ısı işlemler, aseptik ambalajlama yöntemleri ve pek çok yöntem uygulanarak, gıda katkı maddesi ilave edilmeden ürün kalitesi ve güvenirliliği artırılabilir. Ancak süt ve süt ürünleri, zengin besleyici niteliğe sahip, çabuk bozulabilen raf ömürleri kısa gıda ürünleridir. Mikrobiyal bozulmaların yanında, sütün kimyasal bileşiminde bulunan lipid ve lipid türevlerinin oksidasyonuna da dikkat edilmelidir. Uçucu yağlar, bazı bitkiler tarafından üretilen sekonder metabolitler olup, antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri sebebiyle ilgi çeken doğal uçucu bileşiklerin bir karışımıdır. Ayrıca Gıda ve İlaç İdaresi (FDA) tarafından gıda katkı maddesi olarak kullanımında GRAS (Genel Olarak Güvenli Olarak Tanınan) kategorisinde tanımlanmaktadır. Yalnız, uçucu yağların istenen antimikrobiyal etkiyi gösterebilmeleri için gerekli kullanım dozu kabul edilebilir duyu seviyesinin üstünde olabileceğinden, kullanımları genel olarak sınırlı tutulmaktadır. Gıda ambalajlarına ilave edilerek kullanımlarında ise, etken bileşenin ürüne geçişi sınırlandırılmış olacağından, gıdalarda istenmeyen rahatsız edici tat ve aromanın oluşması engellenmiş olacaktır (Ertekin, 2020).

Türkiye’de fazla sayıda çeşitliliğe sahip, tıbbi ve aromatik bitkiler arasındaki kekiğin ekonomik olması sebebiyle kullanım potansiyeli yüksektir. Türkiye’de birçok çeşide sahip olmasına rağmen, uçucu yağ bileşeni karvakrol ve timol içeren türler ‘kekik’ olarak adlandırılmıştır (Uğurtay, 2020). Uçucu yağ bileşenleri; kekiğe antimikrobiyal ve antioksidan özellik kazandırmakla birlikte kendine özgü kokusunu da veren fenolik bileşiklerdir (Ložienė ve ark., 2007). Uzun yıllar boyunca, kekik türleri ve ürünleri, dünya çapında gıda sistemlerinde aroma maddesi olarak kullanılmıştır (Nabavi ve ark., 2015).

Son yıllarda, gıdalarda mikrobiyal patojen direncini çözmek için alternatif arayışların ortaya çıkması ve sentetik koruyucuların sağlıkla ilgili olumsuz etkileri sebebiyle diğer uçucu yağların yanı sıra kekik türleri uçucu yağlarının da antimikrobiyal ve antioksidan potansiyeli detaylı olarak araştırılmıştır. Kekik uçucu yağları ve bunların nanoemülsiyonları, GRAS kategorisine girmekte olup gıda ürünlerindeki çok çeşitli patojenlere karşı potansiyel inhibitör aktivite göstermektedir. Böylece, kekik uçucu yağları hem gıda endüstrisinin hem de tüketicilerin ihtiyaçlarını karşılamada doğal koruyucuların geliştirilmesi için bir kaynak olabilecektir. Bununla birlikte, uçucu yağların antimikrobiyal ve antioksidan potansiyeline rağmen, gıda amaçlı kullanımlarını düşünmeden önce olası yan etkilerini ve güvenlik seviyelerini değerlendirmek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır (Pandey ve ark., 2021).

Bu derleme ile Türkiye’de çeşitliliği yüksek olan ve tıbbi aromatik bitkiler arasında bulunan kekik bitkisinin, bitkiden elde edilen kekik uçucu yağının veya nanoemülsiyonlarının ve diğer uçucu yağlarla oluşturulmuş kombinasyonlarının süt ve süt ürünlerindeki işlevleri ile ilgili mevcut çalışmalar gözden geçirilerek araştırma sonuçları sunulacaktır.

## 2. Uçucu Yağlar

### 2.1. Uçucu yağların elde edilmesi

Uçucu yağları ekstrakte etmek için hidrodestilasyon, buhar destilasyonu, çözücü ekstraksiyonu, basınç altında ekspresyon, süperkritik sıvı ekstraksiyonları ve subkritik su ekstraksiyonları gibi teknikler kullanılmaktadır (Şengezer & Güngör, 2008; Properzi ve ark., 2013; Aslan Öz, 2017). Çoğunlukla uçucu yağlar; tohumlar, yapraklar, kökler, gövdeler, çiçekler ve meyveler dahil olmak üzere çeşitli bitki organlarının salgı yapılarından genel olarak Clevenger aparatı kullanılarak hidro veya buhar damıtması yoluyla elde edilir (Soleimani ve ark., 2022).

### 2.2. Kekik türlerinde bulunan uçucu yağlar ve bunların fitokimyasal özellikleri

Uçucu yağların kimyasal bileşimi, farklı aşamalarda sürgün/yaprak hasat zamanı, ekstraksiyon prosedürü, kurutma yöntemi, genetik ve taksonun evrimi ile birlikte fizyolojik ve çevresel koşullar gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Ložienė & Venskutonis, 2005; Tamar ve ark., 2019).

Yapılan çalışmalarda farklı kekik türlerinin uçucu yağlarının ana bileşenleri; *T. calcareus* da timol (%55.45) (Aprotosoie ve ark., 2019); *T. capitatus* da karvakrol (%81.8), linalool, (E)-caryophyllene (Marin ve ark., 2018); *T. leptobotrys* da karvakrol (%76.94); *T. riararum* da karvakrol (%32.24), terpinene, p-cymene; *T. satureioides* da borneol (%27.71), timol (Boubaker ve ark., 2016); *T. linearis* da timol (%66.65), p-cymene,  $\gamma$ -terpinene (Verma ve ark., 2016); *Thymus vulgaris* de timol, kamfen, kariyofilen, humulen (Al-Asmari ve ark., 2017); *Thymus vulgaris L.*' de timol, p-simen, limonen, karvakrol (Gonçalves ve ark., 2017); *T. munbyanus subsp. abylaeus* da  $\alpha$ -terpinyl acetate (%51.7),  $\alpha$ -terpineol, borneol (Benomari ve ark., 2020); *T. serpyllum* da timol (%58.25), karvakrol, p-cymene,  $\gamma$ -terpinene (Kirillov ve ark., 2016); *T. zygis subsp. sylvestris* de p-cymene (%22.0), timol, karvakrol (Rodriguez ve ark., 2019) olarak bildirilmiştir.

### 2.3. Uçucu yağların antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri

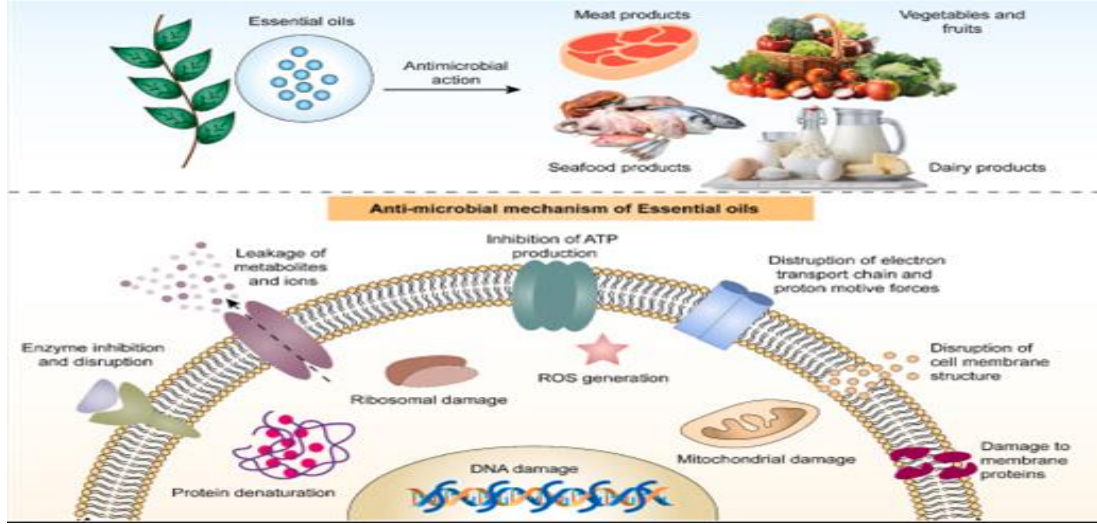
#### 2.3.1. Antimikrobiyal etki

Günümüzde sağlık tehlikelerini ve ekonomik kayıpları azaltmak, hem patojen bakterilerin varlığını kontrol etmek hem de işlem görmüş gıdanın raf ömrünü uzatmak için doğal bileşiklerin antibakteriyel olarak kullanımı etkili bir yöntem olarak gözükmektedir (Oussalah ve ark., 2004).

Uçucu yağların antimikrobiyal aktiviteleri birçok bileşiğe bağlı olarak oluşmaktadır. Uçucu yağ ve bileşenlerinin (fenolik yapıdaki monoterenlerin) en önemli karakteristik özelliği olan su geçirmezlik (hidrofobisite), mikroorganizmaların hücre zar yapısındaki fosfolipit tabakasını uyararak enzim sistemlerini bozmakta veya hücre içi organellerin geçirgenliğini artırmaktadır. Geçirgenliğin artması ile molekül ve iyonların hücre dışına sızması sonucu hücre ölümü gerçekleşmektedir. Ayrıca hücresel enerji sistemine müdahale ederek ve proton hareket gücünü bozarak sitoplazmik zarın zarar görmesine neden olmakta ve bunun sonucunda da hücre ölümüne yol açmaktadır (Viuda-Martos ve ark., 2008; Ertürk ve ark., 2010).

Kekik uçucu yağlarında bulunan timol,  $\gamma$ -terpinen, karvakrol ve p-simen gibi ana bileşikler, gıda sistemlerindeki antimikrobiyal ve antioksidan özelliklerden sorumludur (Čavar Zeljković & Maksimović, 2015). Kekik uçucu yağlarının *L. monocytogenes*'in gelişimini inhibe ettiği ve nisinle beraber elektrik şoku etkisinden çok daha fazla güçte etki gösterdiği, ayrıca hücre membranını ve organellerini bozarak *Aspergillus niger*'e karşı da inhibitör etki gösterdiği bildirilmiştir (Coşkun, 2006). Şekil 1'de gıdalara ilave edilen uçucu yağların antimikrobiyal etki mekanizması gösterilmiştir (Rout ve ark., 2022).

İzomerik fenol sınıfına ait olan karvakrol ve timol ile fenilpropanoid sınıfında yer alan sinamaldehit, *Escherichia coli* O157 ve *Salmonella typhimurium* bakterilerinin membranlarını parçalayarak membranla ilgili materyallerin hücre dışına çıkmasını sağlar; terpenoidler ve fenilpropanoidlerin ise lipofilik özellikleri sayesinde bakteri duvarını delerek hücrenin daha iç kısımlarına ulaşarak antibakteriyel etki gösterirler. *Thymus vulgaris* (bahçe kekiği), *Thymus rariflorus* (yabani kekik) veya bunların aktif bileşiklerinin *Penicillium türlerinden P. verrucosum*, *P. verrucosum var. chrysogenum*, *P. citrinum*, *P. italicum*, *P. digitatum* üzerine güçlü antifungal etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Nguefack ve ark., 2009; Bayaz, 2014). Yabani İran kekiği esansiyel yağının, İran beyaz peynirinde *Aspergillus flavus* ATCC 15546'nın gelişimi üzerine yapılan bir çalışmada, test edilen tüm uçucu yağ konsantrasyonlarının fungal gelişim ve aflatoksin gelişimini engellediği görülmüştür (Gandomi ve ark., 2009; Bayaz, 2014).



Şekil 1. Uçucu yağların antimikrobiyal etki mekanizması (Rout ve ark., 2022).

### 2.3.2. Antioksidan etki

Lipidler okside olma riski en yüksek olan bileşiklerdir ve lipit oksidasyonu gıdanın işlenmesi ve depolanması esnasında önemli bozulma sebeplerinden biridir. Lipid oksidasyonu sonucunda diğer gıda bileşenleri etkilenerek, ürünün besin değerini düşüren, raf ömrünü kısaltan, tat ve aromayı değiştiren ve insan sağlığı üzerinde istenmeyen etkilere neden olan ürünler (peroksitler, hidrokarbonlar, aldehitler, ketonlar, alkoller ve asitler) oluşmaktadır (Kumar, 2007; Turan ve ark., 2012). Lipit oksidasyonunu geciktirme etkisine de sahip olan uçucu yağlar (Tohidi ve ark., 2017) genellikle yağ asidi-gliserol esteri yapısında olmadığından zamanla acılaşıma göstermemektedir (Aslan Öz, 2017).

Antioksidanlar; fenolik ajanlar yardımıyla bir ya da birkaç protonu serbest radikal veya serbest peroksit radikali ile değişerek, şelatlayıcı ajanlar ile metalleri bağlayarak, radikal süpürücüleri ile reaktif oksijeni ya da reaktif oksijenin yoğunluk farkını azaltarak serbest radikal oluşumunu azaltır ya da durdururlar (Kılınç, 2021).

Uçucu yağların antioksidan etkisi; içerdikleri fenolik hidroksil gruplarından kaynaklanmaktadır ve bu bileşiklerin tekli oksijen oluşumunu engelleme, serbest radikalleri temizleme ve metal iyonlarla bileşik oluşturma gibi özellikleri sayesinde gerçekleşmektedir (Emir Çoban & Patır, 2010).

Bütillenmiş hidroksitoluen (BHT) ve bütillenmiş hidroksianisol (BHA) gibi sentetik antioksidanların canlı organizma üzerinde karsinonejik etki gösterdiği belirtilmektedir. Bu nedenle uçucu yağların alternatif antioksidan olarak kullanımı ile ilgili çalışmalara son yıllarda hız verilmiştir. Kekikğin uçucu yağ bileşenlerinden timolün antioksidatif aktivitesinin, yapısında yer alan fenolik grupların oksidasyonun ilk basamağında açığa çıkan peroksit radikallerinin oluşumunu azaltmasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Bayaz, 2014). Günümüzde, pek çok araştırmacı güvenli doğal antioksidanları aramak için farklı esansiyel yağların antioksidan aktivitesini araştırmaktadır. Araştırma sonuçlarında uçucu yağların ideal bir doğal antioksidan kaynağı olduğu belirlenmiştir. Örneğin; 25 uçucu yağ arasında yapılan bir çalışmada en fazla antioksidan aktiviteyi kekik uçucu yağı gösterirken kişniş, okaliptüs, ardıç, kimyon, fesleğen, tarçın, karanfil uçucu yağlarının da kayda değer antioksidan aktivite gösterdiği belirlenmiştir (Shaaban ve ark., 2012; Aslan, 2020)

## 3. Süt ve Süt Ürünleri Mikrobiyolojisi ve Uçucu Yağların Etkisi

Gıda maddeleri gerek işlenmemiş gerekse de işlenmiş halde kalite özelliklerini olumsuz etkileyen önemli etkenlerle karşı karşıyadır. Süt ürünlerinde bu etkenlerden biri de küflerdir. Peynirlere kontamine olmuş bazı küflerin, üründe kalite bozukluklarına, ekonomik kayıplara ve insan sağlığını tehdit eden mikotoksinlerin oluşumuna sebep olduğu yapılan çalışmalarla belirlenmiştir.



Uçucu yağların antifungal etkilerini, hücre membran yapısının ve hücre solunumunun bozulması, enzimin bloke edilmesi, DNA ve RNA sentezinin inhibisyonu şeklinde gerçekleştirdiği bildirilmektedir. Beyaz peynir, kaşar, cheddar, tulum peyniri, vb. birçok peynirde fungal gelişim üzerine yapılan çalışmalarda bozulma etkeni küflerin çoğunlukla *Penicillium sp.* kaynaklı olduğu ancak bununla beraber *Mucor sp.*, *Aspergillus sp.*, *Geotrichum sp.*, *Rhizopus sp.*, *Alternaria sp.* küflerinin de çoğu zaman gelişme imkanı bulduğu bildirilmiştir. Küf gelişimini önlemede önemli rol oynayan bileşiğin miktarı, uçucu yağ çeşidine göre farklılık arz eder. Kekikte (*Thymus vulgaris*) bu bileşiklerin thymol, eugenol, p-cymene ve 1,8-cineole olduğu bilinmektedir. Esansiyel yağ kullanımının maliyeti, duyuusal yönden oluşturduğu etkiler ve bazı model gıdalarda kullanılabilirliği üzerine daha fazla çalışmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Uçucu yağların peynir üretiminde kullanılan starter kültürlerin gelişimini (laktokok ve streptokok) baskılayıp baskılamayacağı, peynirlerin üretim teknolojilerini nasıl etkileyeceği, duyuusal olarak kabul görüp görmeyeceği ve *Clostridium tyrobutyricum*'a karşı göstereceği antimikrobiyal etkilerin incelendiği bir çalışmada, üretilen peynir örneklerinde ön denemeler yapılarak farklı oranlarda uçucu yağlar kullanılmış ve bu yolla duyuusal yönden kabul edilebilir en üst sınırlar belirlenmiştir. Üst sınır belirlendikten sonra pastörize süte ve peynir telemesine ve ilave edilerek ayrı ayrı en uygun konsantrasyonlar hazırlanarak peynirler üretilmiştir. Çalışma sonucunda uçucu yağların starter kültür gelişimini önemli düzeyde teşvik edici veya inhibe edici etki yapmadığı, en fazla antimikrobiyal etkiyi kekik uçucu yağının gösterdiği ortaya konmuştur (Cankurt, 2015).

#### 4. Kekik Süt ve Süt Ürünlerinde Kullanımı ile İlgili Çalışmalar

Yumuşak peynirlerde (az ve tam yağlı) belirli konsantrasyonlarda (%0.1, %0.5 ve %1) kekik, defne, sarımsak ve tarçın uçucu yağlarının kullanıldığı bir çalışmada, uçucu yağların etkileri 14 günlük bir süre boyunca 4°C ve 10°C'de *Listeria monocytogenes* ve *Salmonella enteritidis*'e karşı incelenmiştir. Az yağlı peynirde %1 konsantrasyonda tüm uçucu yağlar, *L. monocytogenes*'i 1.0 log<sub>10</sub> cfu ml<sup>-1</sup> 'den daha düşük bir seviyeye düşürmüştür. Tam yağlı peynirde ise bu azalmayı sadece karanfil uçucu yağı sağlamıştır. Kekik uçucu yağının tam yağlı peynirde *S. enteritidis*'e karşı etkisiz olduğu ancak az yağlı peynirlerde *Salmonella enteritidis*'e karşı; defne, tarçın ve sarımsak uçucu yağlarının yağlı peynirlerde gösterdiği etkiye benzer bir antimikrobiyal etki sağladığı görülmüştür. Antimikrobiyal etki ile *S. Enteritidis* düzeyi 1.0 log<sub>10</sub> cfu ml<sup>-1</sup> 'den daha düşük bir seviyeye düşürülmüştür (Smith ve ark., 2001).

Bazı bitkisel uçucu yağların, beyaz peynirde lipoliz üzerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada, yaban sarımsağı, nane ve kekik uçucu yağları tek tek ve kombinasyonlar halinde beyaz peynir örneklerinde denenmiştir. Peynir örnekleri 90 gün olgunlaşmaya bırakılmıştır. Olgunlaşma başlangıcından 60. güne kadar lipoliz oranının arttığı, daha sonra 90. güne kadar düştüğü gözlenmiştir. En yüksek lipoliz oranı kontrol örneğinde gözlenirken, en düşük lipoliz oranı ise kekik uçucu yağı ve kekik-yaban sarımsağı kombinli uçucu yağların ilave edildiği beyaz peynir örneklerinde görülmüştür (Ayar, 2002).

Kaşar peynirinin muhafazasında farklı antimikrobiyal içerikte yenilebilir filmlerin mikrobiyal inaktivasyona etkisinin incelendiği başka bir çalışmada, peynir altı suyu protein izolatından kekik, biberiye, sarımsak uçucu yağları ilaveli yenilebilir filmler üretilmiş, bu filmler kaşar peynirlerine uygulanmıştır. Çalışma sonucunda kekik ve sarımsak uçucu yağlarını içeren filmlerin önemli oranda antimikrobiyal etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (Sarıküş, 2006).

Kekik uçucu yağının tereyağlarındaki antioksidan özelliğini belirlemek için, *Satureja cilicia* türünün kullanıldığı bir çalışmada, *S. cilicia*'nın içerdiği timol, p-simen, ve karvakrolun tereyağlarında güçlü antioksidan etkisinin olduğu yapılan testler ile ortaya konmuştur. Tereyağına % 0.5, %1 ve %2 oranlarında kekik uçucu yağı ilave edilmiş ve bu örnekler 4°C ve 20°C'de 60 günlük depolama süresince incelenmiştir. Uçucu yağ konsantrasyonu ile antioksidan aktivitenin doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir (Özkan ve ark., 2007).

Krem peynire kekik ve biberiye esansiyel yağlarının ilavesi ile hazırlanan aromalı peynirlerin, oksidatif ve fermantatif stabiliteyi üzerine uçucu yağların etkisinin değerlendirildiği bir çalışmada, uçucu yağ, Clevenger tipi aparat kullanılarak hidrodistilasyon yoluyla 1 saat 100 °C'de damıtılarak elde edilmiştir. Kekik esansiyel yağının ana bileşenleri terpineol (E) (55.5 g/100 g), β-terpinen-4-ol (15.9 g/100 g) ve timol (12.9 g/100 g); biberiye esansiyel yağındaki ana bileşenler 35.70 g/100 g kafur,



26.20 g/100 g verbenon ve 15.80 g/100 g  $\beta$ -karyofilen olarak belirlenmiştir. 100 g taze krem peynire 0.2 g esansiyel yağ ilave edilerek örnekler hazırlanmıştır. Eklenen uçucu yağ, ürün homojen hale gelinceye kadar 5 dakika boyunca laminer akış kabini altında steril spatula ile karıştırılmıştır. Numunelerin, depolamanın 0, 7, 14, 21, 28 ve 35. günlerinde kimyasal, mikrobiyolojik ve duyu analizleri gerçekleştirilmiştir. Depolama boyunca fermentasyon göstergeleri olarak pH değeri, asitlik değeri ve toplam canlı bakteri sayısı olarak belirlenmiştir. Kullanılan uçucu yağların; depolama boyunca oksidasyona ve fermentatif bozulmalara karşı koruyucu etki ve peynirde daha uzun raf ömrü sağladığı ortaya konulmuştur (Olmedo ve ark., 2013).

Bazı baharat türlerinin eritme peynirinde seçilmiş bazı patojen bakteriler (*Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli*) üzerine inhibisyon etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, eritme peyniri içerisine ağırlıkça %1 ve %3 olarak kekik, dereotu, nane, anason ve sarımsak tozu baharatları ilave edilmiştir. Numuneler +4°C'de 90 günlük depolama boyunca analiz edilmiştir. Kullanılan bütün baharatların *E. coli* bakterisi üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. En iyi sonucun %3 oranında kekik ilave edilen eritme peynirinde görüldüğü ve peynir içindeki toplam mezofilik aerobik bakteri seviyesinde 90 günün sonunda %38.26 azalma gerçekleştiği belirlenmiştir. Yine bu süre sonunda *E.coli*'nin tamamen inhibe olduğu, *S. aureus* sayısında ise %44.60 azalma gerçekleştiği, aynı zamanda Gram pozitif ve Gram negatif bakteriler üzerinde bakteriyostatik etkilerinin olduğu tespit edilmiştir. Duyusal analiz sonuçları değerlendirildiğinde tat yönünden en çok beğeni alan peynirler sade, %1 kekik içeren, %3 kekik içeren, %3 dereotu ve %3 nane içeren peynirler olarak sıralanırken; yapı bakımından en çok beğeni alan peynirler sade, %3 nane içeren, %1 nane içeren, %3 sarımsak içeren ve %1 sarımsak içeren peynirler olarak sıralanmıştır (Gümüş & Bursa, 2015).

Sığır stafilokokları ve streptokok mastitis patojenlerine karşı kullanılan antibiyotiklere alternatif olarak *Thymus vulgaris* ve *Lavandula angustifolia* uçucu yağlarının antimikrobiyal etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada; dört çiftlikte sağılan sütler, California Mastitis Testi (CMT) kullanılarak klinik mastitis varlığı açısından 5 ay boyunca haftalık olarak incelenmiştir. Bu arada *T. vulgaris* ve *L. angustifolia*'nın uçucu yağları buharla ekstrakte edilmiştir. Tek başına veya kombinasyon halinde %10, %20 ve %30 olmak üzere 3 farklı konsantrasyonda uygulanmıştır. Veriler, in vitro olarak, kekik ve lavanta uçucu yağlarının, mastitisin ana suşları olan *Staphylococcus sp.* ve *Streptococcus sp.*'a karşı kontrol antibiyotiklerine benzer güçlü antibakteriyel aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir (Abboud ve ark., 2015).

Kekik ve karanfil esansiyel yağı ile güçlendirilmiş yenilebilir filmlerin; kaşar peynirinin fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada, kekik ve karanfil uçucu yağlarını içeren sorbitol- peynir altı suyu izolat esaslı filmler, yarı sert kaşar peynirini kaplamak için kullanılmıştır. Clevenger tipi bir aparat kullanılarak 3 saat boyunca hidrodistilasyon yoluyla elde edilen kekik uçucu yağı için aktif bileşenler %58.1 karvakrol ve %2.4 timol; karanfil uçucu yağı için aktif bileşenler %66.4 öjenol olarak belirlenmiştir. Filmlerin antimikrobiyal özelliklerinin yapay kontaminasyon ile belirlenmesi için *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* ve *Staphylococcus aureus* mikroorganizmaları seçilmiştir. Ayrıca depolama süresi (1., 15., 30. ve 60.) boyunca peynirin bazı fiziksel-kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Sonuçlara göre kekik takviyeli film ve karanfil takviyeli filmin her ikisinin de kaşar peynirinin hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerini olumlu yönde etkilediği bulunmuştur. 60 günlük depolama süresince, *E. coli* O157:H7, *L. monocytogenes* ve *S. aureus* seviyelerinin tümünün, kaplanmamış kontrol numunelerinde artarken uçucu yağlı filmler ile kaplanmış numunelerde azaldığı tespit edilmiştir (Kavas ve ark., 2015).

Yenilebilir kitosan-esansiyel yağ (kekik ve biberiye) filmleri ile kaplanan keçi sütü peynirinin depolama süresince olgunlaşma, su kaybı, organoleptik ve mikrobiyolojik özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada, peynir örnekleri farklı formülasyonda (CH-O ve CH-R) hazırlanan yenilebilir film materyali ile kaplanmıştır. Peynirler 30 saniye boyunca hazırlanan kaplama çözeltilerine art arda iki ve üç kaplama olacak şekilde daldırılmış ve ardından olgunlaşma odasında yüzey kurutması ile kaplanmıştır. Kaplanmamış peynirler de kontrol numunesi olarak olgunlaştırılmıştır. Kekik ve biberiye uçucu yağı içeren film kaplamaların lipolitik ve proteolitik aktiviteyi azalttığı, ağırlık kaybını engellediği ve mikrobiyal güvenliği (hem mantarlara, hem de *Penicillium* ve *Mucor'a* karşı) artırdığı görülmüştür. Özellikle kekik esansiyel yağı kullanıldığında, art arda üç kaplamanın uygulanması iki kaplamadan daha etkili olmuştur. Bu sonuç, art arda uygulanan kaplama uygulamalarının, peynir yüzeyinde aktif bileşiklerin tutulmasına yardımcı olduğunu ve antifungal etkilerini daha etkili hale getirdiğini göstermektedir. Organoleptik değerlendirme sonucunda ise lezzet ve aroma açısından en

iyi peynir örneğinin, kitosan-kekik yağı içeren çift kaplanmış peynir olduğu; üç ardışık kaplama işlemi uygulandığında, uçucu yağın istenmeyen aroma algısı eşliğine ulaşıldığı ve kontrolle karşılaştırıldığında peynirlerin tat ve aromasının olumsuz etkilendiği ortaya konmuştur (Embuena ve ark., 2016).

Taze peynirlerin işlenmesi sırasındaki yüksek basınçlı işlem yoğunluğunu ve *L. monocytogenes*'in bozulma etkisini azaltmak için süper kritik ekstraksiyon cihazı ile elde edilen kekik ekstraktının kullanıldığı bir çalışmada, uçucu yağ ekstraksiyonu 30 MPa ve 40 MPa basınç, 40 °C ekstraksiyon kabı sıcaklığı ve 240 dakika sürecince gerçekleştirilmiştir. İçerikçe zengin uçucu yağ 30 MPa'da gerçekleştirilen ekstraksiyonla elde edildiği, elde edilen uçucu yağın toplam uçucuların %94.73'ünü temsil eden toplam 42 uçucu bileşik tanımlandığı bildirilmiştir (%65γ terpinen, %8 p-simene, %5.5 karvakrol ve %5.0 bisabolen). %5 çözünmüş kekik ekstraktı emülsiyonu seyreltilmiş ve %0.03, %0.06, %0.12, %0.25 ve %0.5 (v/w) nihai konsantrasyonu verecek şekilde 1 g peynire eklenmiştir. Peynir, yaklaşık  $10^7$  CFU/g nihai konsantrasyona kadar bir *L. monocytogenes* süspansiyonu ile inoküle edilmiştir. Kekik ekstraktının taze peynire uygulanan yüksek basınçlı işlem yoğunluğunu ve *Listeria monocytogenes*'in neden olduğu bozulma etkisini azalttığı belirtilmiştir. Duyusal analiz, tüketicilerin taze peynir ile düşük konsantrasyonlarda timol ve karvakrol içeren kekik özleri kombinasyonunu beğendiklerini göstermiştir. Sonuç olarak kekik ekstraktının peynir ve benzeri gıda ürünlerinin muhafazasını olumlu etkilediği ve bu sebeple bu ürünlerde kullanılabileceği ifade edilmiştir (Bleoancă ve ark., 2016).

Kavun suyu ve 21°C'de süt (yağsız, %2 yağlı ve tam yağlı) kullanılarak jelatin ve soya lesitini ile nanoemülsifiye edilen timolün antimikrobiyal aktivitesinin karakterize edildiği başka bir çalışmada, yağsız, %2 yağlı ve tam yağlı sütte toplam timol konsantrasyonu sırasıyla 1, 4.5 ve 4.5 g/L olarak belirlenmiş, nanoemülsiyonlar genel olarak her iki ortamda da serbest timolden daha etkili bulunmuştur. 4.5 g/L nanoemülsifiye edilmiş timol, serbest timolün bakteriyostatik etkisiyle karşılaştırıldığında, 48 saat sonra *Listeria monocytogenes*'i %2 yağlı ve tam yağlı sütte sırasıyla 5 log CFU/mL ve 3 log CFU/mL oranında azaltmıştır. Nanoemülsiyonların %2 yağlı sütte 8 saat ve tam yağlı sütte 48 saat sonra *Escherichia coli* O157:H7'yi, tespit limitinin (tespit limiti 1,0 log CFU/ml) altına indirdiği tespit edilmiştir. Yağsız sütte serbest timol, 24 saat sonra *E. coli* O157:H7 için 3 log CFU/mL den daha fazla azalma sağlarken; nanoemülsiyonlar, serbest timolden daha hızlı bir azaltma oranı sergileyerek, 24 saat sonra tespit limitinin altına düşürmüştür. Yağsız sütte 1 g/L serbest timolün, 48 saat içinde *L. monocytogenes*'e karşı sadece bakteriyostatik olduğu belirlenmiştir. İncelenen nanoemülsiyonların, gıda güvenliğini artırmak için yeni antimikrobiyal koruyucular olarak yüksek potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir (Xue ve ark., 2017).

Kekik esansiyel yağı ve mandalina lifi içeren nanoemülsiyon bazlı yenilebilir kaplamaların, az yağlı kesilmiş peynirin raf ömrünün iyileştirilmesi için kullanıldığı bir çalışmada; su buharı direnci, inoküle edilmiş *Staphylococcus aureus*'a karşı antimikrobiyal etkileri ve buzdolabında depolama süresince doğal mikrobiyota gelişimi değerlendirilmiştir. En az %2 kekik uçucu yağı içeren kaplamaların, 15 gün sonra *Staphylococcus aureus* popülasyonunu 6 log CFU/g'dan 4.6 log CFU/g'ye düşürdüğü, %2.5 kekik uçucu yağı içeren kaplamaların da 15 günlük buzdolabında depolama süresinde 1.5 log CFU/g azalttığı, 6 ve 24 günlük depolama sırasında psikrofilik bakteri, küf ve maya çoğalmasını engellediği belirlenmiştir (Artiga-Artigas ve ark., 2017).

*Thymus capitatus* (kekik) bitkisinden hidrodestilasyon ile elde edilen uçucu yağın (ana bileşen %76.1 karvakrol), pastörize ve çiğ süte 1 mg/L eklendiği bir çalışmada; süt örneklerinin toplam asitlikleri, lipit oksidasyon değerleri ve çiğ süt bakteri yükü değerleri kontrol süt örneklerinin değerleri ile karşılaştırılmıştır. Pastörize süte *T. capitatus* uçucu yağı eklenmesinin süten bozulmasını önlemede etkili olduğu bildirilmiştir. Pastörizasyonun çiğ süte uçucu yağ eklenmesiyle birleştirilmesinin, inkübasyonun ikinci gününe kadar kontamine edilen patojenik bakteri gelişimini tamamen engellediği ve ayrıca, süt yağı oksidasyonu göz önüne alındığında sütte peroksit oluşumunu 4. güne kadar önemli ölçüde geciktirdiği bildirilmiştir (Jemaa ve ark., 2018).

Nanoemülsiyonla kapsüllenmiş kekik uçucu yağının, Minas Padrão peynirinde antifungal etkiyi değerlendirmek için kullanıldığı bir çalışmada, kapsüllenmemiş kekik uçucu yağının ve nanoemülsiyonların minimum inhibitör konsantrasyonu (MIC) her bir mantar için belirlenmiştir. Kapsüllenmemiş kekik uçucu yağı konsantrasyonları *Cladosporium* sp., *Fusarium* sp. ve *Penicillium* sp için sırayla 0.05-0.3, 0.1-0.5, 0.1-0.5 µg /mL; nanoemülsiyonlar için ise sırayla 0.16-0.5, 0.03-0.5 ve 0.16-2.5 µg /mL olarak belirlenmiştir. Nanokapsüllenmiş kekik uçucu

yağının, değerlendirilen üç küf (*Cladosporium* sp., *Fusarium* sp. ve *Penicillium* sp.) cinsine karşı engelleyici bir etki gösterdiği sonucuna varılmıştır. *Fusarium* sp. için, esansiyel yağın kapsüllenmesinin antifungal etkiyi geliştirdiği, *Penicillium* sp. için ise bu cinse karşı inhibe edici etkisini azalttığı bildirilmiştir. Depolama sıcaklığı ve su aktivitesi gibi çevresel parametreler kontrol edilirse, kekik yağı nanoemülsiyonlarının engelleyici etkisinin büyük ölçüde geliştirilebileceği ve Minas Padrão peynirinin küf kontaminasyonuna karşı korunmasında potansiyel bir alternatif olarak sunulabileceği belirtilmiştir (Bedoya-Serna ve ark., 2018).

Kekik yağı ve nisin, süt kaymağına inoküle edilen *L. monocytogenes* ve *S. aureus* üzerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, iki paralelli olarak analizleri gerçekleştirilen örneklerin 0., 3., 5. ve 7. depolama günlerindeki mikrobiyolojik takibi gerçekleştirilmiştir. 100 gram kaymak için eklenen kekik yağı miktarları 250 µl ve 500 µl (%0.25 ve %0.5) olarak ayarlanmıştır. Kullanılan %0.5 oranındaki kekik yağının *L. monocytogenes* ve *S. aureus* içeren kaymak örneklerinde daha fazla antimikrobiyal etki gösterdiği, kekik yağının eklenmesinin kaymağın kendine özgü tat ve kokusunu önemli derecede baskıladığı bildirilmiştir (Üstündağ, 2019).

Bitkisel uçucu yağlar içeren peynir altı suyu proteininin yenilebilir filmlerin dilimlenmiş kaşar peynirinin mikrobiyal inaktivasyonuna etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, dilimlenmiş kaşar peynirinin mikrobiyal kontaminasyonunu azaltmak amaçlanmış, *Escherichia coli* 0157:H7, *Salmonella Enteritidis*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* ve *Penicillium* spp. ile kontamine edilmiş peynir dilimleri üzerine her birinden %2 oranında kekik yağı, sarımsak yağı, nisin ve natamisin içeren peynir altı suyu proteini izolatu filmleri katman olarak kullanılmıştır. Mikrobiyal inaktivasyon, 15 günlük depolama süresince incelenmiş, bitkisel uçucu yağlar içeren peynir altı suyu proteini izolatu filmlerinin dilimlenmiş kaşar peyniri üzerine uygulanmasının, depolama sırasında önemli mikrobiyal azalmalar sağladığı belirlenmiştir (Seydim ve ark., 2020).

Zencefil, karanfil ve kekik esansiyel yağlarının yumuşak peynirin mikrobiyal güvenliğini ve duyuşal özelliklerini geliştirmek için uygulandığı bir çalışmada, hidrodestilasyonla ekstraksiyon gerçekleştirilmiştir. Clevenger tipi aparat kullanılarak 2 saat hidrodestilasyon işlemi gerçekleştirilerek uçucu yağlar elde edilmiştir. Zencefil uçucu yağında 82 bileşen (%0.18-0.22 v/w verim); karanfil uçucu yağında 13 bileşen (%2 v/w verim); kekik (*Thymus vulgaris* L.) uçucu yağında 41 uçucu bileşen (%0.9 v/w verim) tanımlanmıştır. GC-MC ile yapılan analizler sonucunda zencefil, kekik ve karanfil uçucu yağları için ana bileşenler sırasıyla kamfen, timol ve öjenol olarak belirlenmiştir. Minimum inhibitör konsantrasyonu, agar difüzyon yöntemi ile belirlenmiştir. Pastörize edildikten sonra soğutulan süte maya ilavesinden sonra maksimum %0.02 oranında CaCl<sub>2</sub> ve test edilen suşlar (*P. aeruginosa* ve *S. aureus*) ilave edilmiş, ardından bu sütler kontrol grubu ve uçucu yağların ilave edildiği(%0.01 konsantrasyon) test grupları olarak ayrılmıştır. *S. aureus* ve *P. aeruginosa* ile inoküle edilmiş taze yumuşak peynir modelinde, uçucu yağ ilavesiyle organoleptik özelliklerde bir iyileşme ile birlikte 4°C'de 1 aylık depolama süresi boyunca önemli antimikrobiyal etki gösterdiği bildirilmiştir. Zencefil ve kekik yağları ile zenginleştirilmiş taze yumuşak peynir, 4 °C'de 1 aylık depolama süresi boyunca genel duyuşal kabul edilebilirlik açısından en iyi puanları almıştır. Ayrıca uçucu yağ ile zenginleştirilmiş peynirde depolama süresi sonunda, sırasıyla kekik ve zencefil ile zenginleştirilmiş peynirin depolanmasının birinci ve ikinci haftalarının sonunda metisiline dirençli *Staphylococcus aureus* (MRSA)' un tamamen ve *P. aeruginosa*'nın ise yaklaşık %50 oranında azaldığı ortaya konmuştur (Ahmed ve ark., 2021).

Mısır Talaga peynirinde üç uçucu yağ (kekik, kimyon ve karanfil) ve bunların nanoemülsiyonlarının peynire inoküle edilen *Listeria monocytogenes* ve *Shigella flexneri* üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada, kekik uçucu yağının (karvakrol), peynirde duyuşal bozukluk olmaksızın mükemmel antibakteriyel aktivite gösterdiği belirlenmiştir. Tüm uçucu yağların ve bunların nanoemülsiyonlarının minimum inhibitör konsantrasyonu (MIC), *L. monocytogenes*'e karşı %0.78 ve *S. flexneri*'ye karşı %1.56; karvakrol ve nanoemülsiyonunun her iki mikroorganizmaya karşı minimum inhibitör konsantrasyonu ise %0.78 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç karvakrolun lipopolisakaritleri, K<sup>+</sup> ve ATP'yi serbest bırakıp sitoplazmik zarın geçirgenliğini artırarak *S. flexneri*'nin dış zarını bozma kabiliyetine ve ayrıca zar proteinleri ve hücre içi hedeflerle etkileşimine atfedilmiştir. Karvakrol uçucu yağı %0.78 konsantrasyonda *S. flexneri* için 7 gün sonra ve *L. monocytogenes* için 3 hafta sonra inhibitör etki gösterirken, diğer nanoemülsiyonlarda daha yüksek konsantrasyon ve daha uzun süre gerektiği bildirilmiştir (Elsherif ve ark., 2021).

*Thymus capitatus* ile zenginleştirilmiş yenilikçi bir koyun peyniri geliştirmek amacıyla yapılan çalışmada, hidrodestilasyon yöntemiyle uçucu yağ elde edilmiştir. *T. capitatus* esansiyel yağının GC-MS ve GC-FID analizi ile tespit edilen aktif uçucu bileşenleri timol (%40.1), *p*-cymene (%33.0), linalool (%6.5) olarak belirlenmiştir. *T. capitatus* uçucu yağı, hazırlanan iki tip lipozoma (A ve B) dahil edilmiştir. 5 mg/ml uçucu yağ, 60 mg/ml fosfolipid ve 1 ml su içeren Lipozom A(Lecinova) ve Lipozom B(S75) hazırlanmıştır. Geleneksel "Pecorino Romano" peynirinin standart preparasyonunun değiştirilmiş bir versiyonu kullanılarak üç benzer peynir örneği hazırlanmıştır. Taze koyun peynirine dahil edilmiş, nanoformülasyonun homojen bir dağılımını elde etmek için peynirin farklı bölgelerine altı enjeksiyon (her biri 10 mL) yapılmıştır. Ardından tuzlanan peynir 8–12°C'de termostatlı bir odada olgunlaşmaya bırakılmıştır. Üretimden 20 gün sonra (taze peynir), 60 gün sonra (yarı olgun peynir) ve 180 gün sonra (olgun peynir) olmak üzere üç ayrı zaman diliminde analiz edilmiştir. *Koyun peynirlerine T. capitatus* uçucu yağ lipozomlarının eklenmesi, peynirin normal olgunlaşması ile laktik floranın büyüme ve gelişmesinde etkileşime neden olmamıştır. *T. capitatus* uçucu yağı nanoformülasyonları ile zenginleştirilmiş koyun peynirinin, lipozomal uçucu yağ içermeyen peynire kıyasla 180 güne kadar iyi bir antioksidan aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir (Gil ve ark., 2022).

Minas peynirinde kekik (*Origanum vulgare* L.) esansiyel yağının *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Aspergillus flavus*, *Fusarium oxysporum* ve *Penicillium citrinum*' a karşı antimikrobiyal etkisini belirlemek amacıyla buhar destilasyonu ile elde edilmiş kekik uçucu yağı (0,954 g/mL yoğunlukta, %71 karvakrol, % 3 timol, %4.5 terpinen, %3.5 para-cymene ve %4 beta-kariofilen aktif uçucu bileşenlere sahip) kullanılmıştır. Peynirler *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* ve *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*'ten oluşan mezofilik liyofilize laktik kültürden %0.6 (m/v) oranında kullanılarak elde edilmiştir. Laktik kültüre karşı minimum inhibitör konsantrasyonu (MIC), 18 saatlik inkübasyondan sonra görünür büyümeyi engelleyen en düşük uçucu yağ konsantrasyonu olarak belirlenmiş, %0.02 (v/v) kekik esansiyel yağı ilavesiyle standart Minas peyniri üretimi gerçekleştirilmiştir. Uçucu yağ, laktik asit bakterileri ilavesinden sonra süte eklenmiş ve süt karıştırılarak homojen dağılım sağlanmıştır. Tüm üretim aşamalarından sonra peynir 2 dakika boyunca mikrobiyal süspansiyona daldırılarak kontaminasyonu sağlanmıştır. Daha sonra peynir 30 gün boyunca olgunlaştırılmış, deneysel peynir örnekleri laboratuvarında 30 gün, 10-12 °C'de ve %85 bağıl nemli ortamda muhafaza edilmiştir. Üretim 0., 1., 3., 6., 15. ve 30. günlerinde bakteri ve mantar hücre sayımı yapılmıştır. Kekik uçucu yağ konsantrasyonunun (%0.02 v/v) kontaminant mikroorganizmaların gelişimini engellemek için yeterli olduğu, laktik asit bakterilerini etkilemediği ve dolayısıyla peynir özelliklerini koruduğu belirlenmiştir. Duyusal değerlendirmelerde görünüş, tat/koku ve aroma nitelikleri puan ortalaması beğeni düzeyine göre (Hiç beğenmeme (1) ile çok beğenme (5) arasındaki uç noktaları içeren beş noktalı hedonik ölçek) 4'ün üzerinde, yumuşaklık niteliği için puan ortalaması 3.95 puan ile değerlendirilmiştir (Leonelli Pires de Campos ve ark., 2022).

## 5. Sonuç

Son yıllarda tüketiciler tarafından gıda maddelerinde kullanılan sentetik koruyucuların özellikle sağlık endişeleri yaratması sebebiyle, bu maddeler yerine doğal koruyucuların kullanılması tercih edilmektedir. Doğal koruyucuların insan sağlığı için yararlı birer ürün olmaları da bu tercihte etkili olmaktadır. Yapılan çalışmaların sonuçları, çeşitli kekik ve uçucu yağlarının, yağ veya nanoemülsiyon şeklinde; direkt olarak gıdalarda, yenilebilir film kaplamalarda veya ambalaj malzemelerinde kullanımının, süt ve süt ürünlerinde antioksidan, antimikrobiyal ve aroma artırıcı olarak umut verici olduğunu göstermektedir. Böylelikle tüketiciler için daha sağlıklı ürünler sunulacak, mikrobiyolojik bozulmalardan kaynaklı kayıplar azaltılmış olacak ve ürün çeşitliliği zenginleştirilerek organoleptik yönden tüketicinin zevkle tüketebileceği yeni ürünler gıda endüstrisine kazandırılmış olacaktır. Güçlü aromaları nedeniyle mikrokapsülleme gibi yöntemlerle de istenmeyen organoleptik özellikler maskelenerek, ortama salınım hızı kontrollü ve uygun dozda kullanımları sağlanarak uçucu yağların kullanım potansiyelini artıracak geniş kapsamlı çalışmaların yapılması önerilmektedir. Süt ve süt ürünleriyle güvenlik, toksisite, sinerjistik ve antagonistik etkileri ile ilgili ek çalışmalara da ihtiyaç giderek artmaktadır.



## Kaynakça

- Abboud, M., El Rammouz, R., Jammal, B., & Sleiman, M. (2015). In vitro and in vivo antimicrobial activity of two essential oils *Thymus vulgaris* and *Lavandula angustifolia* against Bovine *Staphylococcus* and *Streptococcus* Mastitis Pathogen. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 4(4), 975-983.
- Ahmed, L. I., Ibrahim, N., Abdel-Salam, A. B., & Fahim, K. M. (2021). Potential application of ginger, clove and thyme essential oils to improve soft cheese microbial safety and sensory characteristics. *Food Bioscience*, 42, 101177. doi:10.1016/j.fbio.2021.101177
- Al-Asmari A.K., Athar M. T., Al-Faraidy A. A., & Almuhaiza, M. S. (2017). Chemical composition of essential oil of *Thymus vulgaris* collected from Saudi Arabian market. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 7(2), 147-150. doi:10.1016/j.apjtb.2016.11.023
- Aprotosoai, A. C., Miron, A., Ciocârlan, N., Brebu, M., Roşu, C. M., Trifan, A., ... & Mihai, C. T. (2019). Essential oils of Moldavian *Thymus* species: Chemical composition, antioxidant, anti-*Aspergillus* and antigenotoxic activities. *Flavour and Fragrance Journal*, 34(3), 175-186. doi:10.1002/ffj.3490
- Artiga-Artigas, M., Acevedo-Fani, A., & Martín-Belloso, O. (2017). Improving the shelf life of low-fat cut cheese using nanoemulsion-based edible coatings containing oregano essential oil and mandarin fiber. *Food Control*, 76, 1-12. doi:10.1016/j.foodcont.2017.01.001
- Aslan Öz, M. N. (2017). *Balıkesir yöresinde doğal olarak yetişen biberiye ve fesleğen bitkilerine ait uçucu yağların antioksidan ve antimikotik özelliklerinin belirlenmesi.* (Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye.
- Aslan, Y. (2020). *Kozmetikte kullanılan bazı koruyucuların bitki ekstraktları ve uçucu yağlar ile tek başına ve kombinasyon halinde antimikrobiyal ve antioksidan etkilerinin araştırılması.* (Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Ayar, A. (2002). Effect of some herb essential oils on lipolysis in white cheese. *Journal of Food Lipids*, 9(3), 225-237. doi:10.1111/j.1745-4522.2002.tb00221.x
- Bayaz, M. (2014). Esansiyel yağlar: Antimikrobiyal, antioksidan ve antimutajenik aktiviteleri. *Akademik Gıda*, 12(3), 45-53.
- Bedoya-Serna, C. M., Dacanal, G. C., Fernandes, A. M., & Pinho, S. C. (2018). Antifungal activity of nanoemulsions encapsulating oregano (*Origanum vulgare*) essential oil: in vitro study and application in Minas Padrão cheese. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(4), 929-935. doi:10.1016/j.bjm.2018.05.004
- Benomari, F. Z., Djabou, N., Moumani, M., Hassani, F., Muselli, A., & Costa, J. (2020). Chemical variability of essential oils of three subspecies of *Thymus munbyanus* Boiss. & Reut. from Western Algeria. *Journal of Essential Oil Research*, 32(5), 474-484. doi:10.1080/10412905.2020.1772134
- Bleoancă, I., Saje, K., Mihalcea, L., Oniciuc, E. A., Smole-Mozina, S., Nicolau, A. I., & Borda, D. (2016). Contribution of high pressure and thyme extract to control *Listeria monocytogenes* in fresh cheese-A hurdle approach. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 7-14. doi:10.1016/j.ifset.2016.09.002
- Boubaker, H., Karim, H., Hamdaoui, A. E., Msanda, F., Leach, D., Bombarda, I., ... & Aoumar, A. A. B. (2016). Chemical characterization and antifungal activities of four *Thymus* species essential oils against postharvest fungal pathogens of citrus. *Industrial Crops and Products*, 86, 95-101. doi:10.1016/j.indcrop.2016.03.036
- Cankurt, H. (2015). *Bazı bitki aromatik su ve uçucu yağlarının blok tipi eritme peyniri ve beyaz peynirin çeşitli özellikleri üzerine etkisi.* (Doktora Tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.
- Ćavar Zeljković, S. & Maksimović, M. (2015). Chemical composition and bioactivity of essential oil from *Thymus* species in Balkan Peninsula. *Phytochemistry Reviews*, 14(3), 335-352. doi:10.1007/s11101-014-9378-9
- Coşkun, F. (2006). Gıdalarda bulunan doğal koruyucular. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 27-33.
- Elsherif, W. M., & Talaat AL Shrief, L. M. (2021). Effects of three essential oils and their nanoemulsions on *Listeria monocytogenes* and *Shigella flexneri* in Egyptian Talaga cheese.



- International Journal of Food Microbiology*, 355, 109334.  
[doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109334](https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109334)
- Embuena, A. I. C., Nacher, M. C., Boix, A. C., Pons, M. P. M., Llopis, M. B., Martínez, M. C. B., & Martínez C. G. (2016). Quality of goats milk cheese as affected by coating with edible chitosan essential oil films. *International Journal of Dairy Technology*, 70(1), 68-76.  
[doi:10.1111/1471-0307.12306](https://doi.org/10.1111/1471-0307.12306)
- Emir Çoban, Ö., & Patır, B. (2010). Antioksidan etkili bazı bitki ve baharatların gıdalarda kullanımı. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), 7-19.
- Ertekin, B. (2020). Süt ve süt ürünlerinin ambalajlanmasında yenilikçi ve doğal yaklaşımlar; esansiyel yağların kullanıldığı polimerik aktif ambalaj çözümü. *Adnan Menderese Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 17(1), 115-121. [doi:10.25308/aduziraat.599339](https://doi.org/10.25308/aduziraat.599339)
- Ertürk, R., Çelik, C., Kaygusuz, R., & Aydın, H. (2010). Ticari olarak satılan kekik ve nane uçucu yağlarının antimikrobiyal aktiviteleri. *Cumhuriyet Tıp Dergisi*, 32(4), 281-286.
- Gandomi, H., Misaghi, A., Basti, A. A., Bokaei, S., Khosravi, A., Abbasifar, A., & Javan, A. J. (2009). Effect of *Zataria multiflora* Boiss. essential oil on growth and aflatoxin formation by *Aspergillus flavus* in culture media and cheese. *Food and Chemical Toxicology*, 47(10), 2397-2400. [doi:10.1016/j.fct.2009.05.024](https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.05.024)
- Gil, K. A., Jerkovic, I., Marijanovic, Z., Manca, M. L., Caddeo, C., & Tuberoso C. I. G. (2022). Evaluation of an innovative sheep cheese with antioxidant activity enriched with different thyme essential oil lecithin liposomes. *LWT - Food Science and Technology*, 154, 112808. [doi:10.1016/j.lwt.2021.112808](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112808)
- Gonçalves, N. D., Pena, F. de L., Sartoratto, A., Derlamelina, C., Duarte, M. C. T., Antunes, A. E. C., & Prata, A. S. (2017). Encapsulated thyme (*Thymus vulgaris*) essential oil used as a natural preservative in bakery product. *Food Research International*, 96, 154-160. [doi:10.1016/j.foodres.2017.03.006](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.006)
- Gümüş, T., & Bursa, İ. A. (2015). Eritme peynirinde bazı patojen bakteriler üzerine farklı baharatların inhibisyon etkisi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 12(3), 18-26. <https://hdl.handle.net/20.500.11776/1985>
- Jemaa, M. B., Falleh, H., Saada, M., Oueslati, M., Snoussi, M., & Ksouri, R. (2018). *Thymus capitatus* essential oil ameliorates pasteurization efficiency. *Journal of Food Science & Technology*, 55(9), 3446-3452. [doi:10.1007/s13197-018-3261-4](https://doi.org/10.1007/s13197-018-3261-4)
- Kavas, G., Kavas, N., & Saygılı, D. (2015). The effects of thyme and clove essential oil fortified edible films on the physical, chemical and microbiological characteristics of kashar cheese. *Journal of Food Quality*, 38(6), 405-412. [doi:10.1111/jfq.12157](https://doi.org/10.1111/jfq.12157)
- Kılınç, B. Ö. (2021). *Osmaniye'de yayılış gösteren Thymus kotschyanus var. glabrescens ve Mentha longifolia subsp. typhoides var. typhoides bitkileri uçucu yağlarının antioksidan ve antikanser aktivitelerinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, Türkiye.
- Kirillov, V., Stikhareva, T., Mukanov, B., Chebotko, N., Ryazantsev, O., Atazhanova, G. & Adekenov, S. (2016). Composition of the essential oil of *Thymus serpyllum* L. from Northern Kazakhstan. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 19(1), 212-222. [doi:10.1080/0972060X.2015.1010600](https://doi.org/10.1080/0972060X.2015.1010600)
- Kumar, R., Mishra, A. K., Dubey, N. K., & Tripathi, Y. B. (2007). Evaluation of *Chenopodium ambrosioides* oil as a potential source of antifungal, antiaflatoxigenic and antioxidant activity. *International Journal of Food Microbiology*, 115(2), 159-164. [doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2006.10.017](https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.10.017)
- Ložienė, K., & Venskutonis, P. R. (2005). Influence of environmental and genetic factors on the stability of essential oil composition of *Thymus pulegioides*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 33(5), 517-525. [doi:10.1016/j.bse.2004.10.004](https://doi.org/10.1016/j.bse.2004.10.004)
- Ložienė, K., Venskutonis, P. R., Šipailienė, A., & Labokas, J. (2007). Radical scavenging and antibacterial properties of the extracts from different *Thymus pulegioides* L. chemotypes. *Food Chemistry*, 103(2), 546-559. [doi:10.1016/j.foodchem.2006.08.027](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.027)
- Leonelli Pires de Campos, A. C., Saldanha Nandi, R. D., Scandorieiro, S., Gonçalves, M. C., Reis, G. F., Dibo, M., ... & Nakazato, G. (2022). Antimicrobial effect of *Origanum vulgare* (L.)

- essential oil as an alternative for conventional additives in the Minas cheese manufacture. *LWT-Food Science and Technology*, 157, 113063. doi:10.1016/j.lwt.2021.113063
- Marin, M., Novakovic, M., Vuckovic, I., Tesevic, V., Kolarevic, S. & Vukovic-Gacic, B. (2018). Wild *Thymus capitatus* hoff. et link. chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of the essential oil. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21(2), 388-399. doi:10.1080/0972060X.2018.1449668
- Nabavi S. M., Marchese, A., Izadi, M., Curti, V., Daglia, M. & Nabavi, S. F. (2015). Plants belonging to the genus *Thymus* as antibacterial agents: From farm to pharmacy. *Food Chemistry*, 173, 339-347. doi:10.1016/j.foodchem.2014.10.042
- Nguefack, J., Dongmo, J. B. L., Dakole, C. D., Leth, V., Vismer, H. F., Torp, J., ... & Nkengfack, A. E. (2009). Food preservative potential of essential oils and fractions from *Cymbopogon citratus*, *Ocimum gratissimum* and *Thymus vulgaris* against mycotoxigenic fungi. *International Journal of Food Microbiology*. 131(2-3), 151-156. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2009.02.009
- Olmedo, R. H., Nepote, V., & Grosso, N. R. (2013). Preservation of sensory and chemical properties in flavoured cheese prepared with cream cheese base using oregano and rosemary essential oils. *LWT-Food Science and Technology*, 53(2), 409-417. doi:10.1016/j.lwt.2013.04.007
- Oussalah, M., Caillet, S., Salmieri, S., Saucier, L., & Lacroix, M. (2004). Antimicrobial and antioxidant effects of milk protein-based film containing essential oils for the preservation of whole beef muscle. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 52(18), 5598-5605. doi:10.1021/jf049389q
- Özkan, G., Simsek, B., & Kuleasan, H. (2007). Antioxidant activities of *Satureja cilicia* essential oil in butter and in vitro. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1391-1396. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.04.020
- Pandey, A. K., Chavez-Gonzalez, M. L., Silva, A. S., & Singh, P. (2021). Essential oils from the genus *Thymus* as antimicrobial food preservatives: Progress in their use as nanoemulsions-a new paradigm. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 426-441. doi:10.1016/j.tifs.2021.02.076
- Properzi, A., Angelini, P., Bertuzzi, G., & Venanzoni, R. (2013). Some biological activities of essential oils. *Medicinal & Aromatic Plants*, 2(5),1-4.
- Rodriguez, V., Cabral, C., Evora, L., Ferreira, I., Cavaleiro, C., Cruz, M. T., & Salgueiro, L. (2019). Chemical composition, anti-inflammatory activity and cytotoxicity of *Thymus zygis* L. subsp. *sylvestris* (Hoffmanns. & Link) Cout. essential oil and its main compounds. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 3236-3243. doi:10.1016/j.arabjc.2015.08.026
- Rout, S., Tambe, S., Deshmukh, R. K., Mali, S., Cruz, J., Srivastav, P. P., ...& de Oliveira, M. S. (2022). Recent trends in the application of essential oils: The next generation of food preservation and food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 129, 421-439. doi:10.1016/j.tifs.2022.10.012
- Shaaban H. A. E., El-Ghorab A. H., & Shibamoto, T. (2012). Bioactivity of essential oils and their volatile aroma components. *The Journal of Essential Oil Research*, 24(2), 203-212. doi:10.1080/10412905.2012.659528
- Sarıkuş, G. (2006). *Farklı antimikrobiyal maddeler içeren yenilebilir film üretimi ve kaşar peynirinin muhafazasında mikrobiyal inaktivasyona etkisi.* (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Seydim, A. C., Sarıkuş-Tutal, G., & Söğüt, E. (2020). Effect of whey protein edible films containing plant essential oils on microbial inactivation of sliced Kasar cheese. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100567. doi:10.1016/j.fpsl.2020.100567
- Smith-Palmer, A., Stewart, J., & Fyfe, L. (2001). The potential application of plant essential oils as natural food preservatives in soft cheese. *Food Microbiology*, 18(4), 463-470. doi:10.1006/fmic.2001.0415
- Soleimani, M., Arzani, A, Arzani, V., & Roberts, T. H. (2022). Phenolic compounds and antimicrobial properties of mint and thyme. *Journal of Herbal Medicine*, 36, 100604. doi:10.1016/j.hermed.2022.100604
- Şengezer, E., & Güngör, T. (2008). Esansiyel yağlar ve hayvanlar üzerindeki etkileri (derleme). *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 48(2), 101-110.

- Tammar, S., Salem, N., Rebey, I. B., Sriti, J., Hammami, M., Khammassi, S., ... & Msaada, K. (2019). Regional effect on essential oil composition and antimicrobial activity of *Thymus capitatus* L. *Journal of Essential Oil Research*, 31(2), 129-137. doi:10.1080/10412905.2018.1539415
- Tohidi, B., Rahimmalek, M., & Arzani, A. (2017). Essential oil composition, total phenolic, flavonoid contents, and antioxidant activity of Thymus species collected from different regions of Iran. *Food Chemistry*, 220,153-161. doi:10.1016/j.foodchem.2016.09.203
- Turan, F., Güragaç, R., & Sayın, S. (2012). Su ürünleri yetiştiriciliğinde esansiyel yağlar. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 5(1), 35-40.
- Uğurtay, A. (2020). *Kekik ekstresinde asetillendirilmiş nişastanın mikroenkapsüle özelliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye.
- Üstündağ, H. Ç. (2019). *Nisin ve kekik yağının kaymağa inoküle edilen Listeria monocytogenes ve Staphylococcus aureus üzerine depolama süresince etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Burdur, Türkiye.
- Xue, J., Davidson, P. M., & Zhong, Q. (2017). Inhibition of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* growth in milk and cantaloupe juice by thymol nanoemulsions prepared with gelatin and lecithin. *Food Control*, 73, 1499-1506. doi:10.1016/j.foodcont.2016.11.015
- Verma, R. S., Padalia, R. C., Goswami, P., Upadhyay, R. K., Singh, V. R., Chauhan, A., & Tiwari A. K. (2016). Assessing productivity and essential oil quality of Himalayan thyme (*Thymus linearis* Benth.) in the subtropical region of North India. *Industrial Crops and Products*, 94, 557-561. doi:10.1016/j.indcrop.2016.09.037
- Viuda-Martos, M., Ruiz-Navajas, Y., Fernández-López, J. & Pérez-Álvarez, J. A. (2008). Antibacterial activity of different essential oils obtained from spices widely used in Mediterranean diet. *International Journal of Food Science and Technology*, 43(3), 526-531. doi:10.1111/j.1365-2621.2006.01489.x



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Derleme Makale

### Epoksi Reçinelerde Kullanılan Alev Geciktirici Bileşikler

**Kaan AKSOY**

Betek Boya ve Kimya Sanayi A.Ş., Gebze Organize Sanayi Bölgesi, Tembelova Alanı, 3200.Sokak, No: 3206,  
41400, Kocaeli, Türkiye

Kaan AKSOY, [ORCID No: 0000-0001-6830-5538](https://orcid.org/0000-0001-6830-5538)

Sorumlu yazar e-posta: [kaan.aksoy@betek.com.tr](mailto:kaan.aksoy@betek.com.tr)

#### Makale Bilgileri

Geliş: 03.08.2022

Kabul: 31.03.2023

Online Ağustos 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1153811](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1153811)

#### Anahtar Kelimeler

Alev geciktirici,

Epoksi,

Kaplama,

Reçine

**Öz:** Epoksi reçineler, ısıya, neme ve kimyasallara karşı mükemmel dirençleri, yüksek gerilme mukavemeti, kürlleme işlemi sırasında düşük büzülme ve mükemmel boyutsal stabiliteleri nedeniyle, elektrik ve elektronik endüstrileri, nakliye, kaplamalar, yapıştırıcılar ve kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Epoksi reçineler oldukça yanıcıdır ve yanıcılık özellikleri, yüksek alev dayanımı gerektiren alanlarda kullanımlarını ciddi şekilde sınırlar. Bu zorlu problemin üstesinden gelmek için halojen bazlı alev geciktiriciler, organik fosfor bileşikler, mineral bileşikler, azot, silikon katkısı gibi çeşitli çözümler, şişen alev geciktirici ve nanopartiküller önerilmiştir. Çoğu fosforlu bileşik, alev geciktirici epoksi reçinelerinde halojen bileşikler yerine kullanılır. Alev geciktirici katkılarla karşılaştırıldığında, epoksi reçinelerdeki reaktif organik fosfor bileşikler mükemmel alev geciktirici verim gösterir. Bu bildiride, alev geciktiricilerin sınıflandırılması (halojen, organik fosfor bileşikler, mineraller, nitrojen ve silikon esaslı malzemeler, şişen alev geciktirici ve nanokompozitler) polimerlerin yanma döngüsü ve epoksi reçineler için özellikle fosfor bazlı malzemeler olmak üzere alev geciktiricilerin uygulanması incelenmiştir. UL-94, sınırlayıcı oksijen indeksi ve koni kalorimetri gibi çeşitli alev geciktirici değerlendirme testleri de kısaca açıklanmıştır.

### Flame Retardant Compounds Used in Epoxy Resins

#### Article Info

Received: 03.08.2022

Accepted: 31.03.2023

Online August 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1153811](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1153811)

#### Keywords

Coating,

Epoxy,

Flame retardant,

Resins

**Abstract:** Epoxy resins are widely used in the electrical and electronic industries, shipping, coatings, adhesives and composites due to their excellent resistance to heat, moisture and chemicals, high tensile strength, low shrinkage during the curing process and excellent dimensional stability. Epoxy resins are highly flammable, and their flammability properties severely limit their use in areas requiring high flame resistance. Various solutions include halogen-based flame retardants, organic phosphorus compounds, mineral compounds, nitrogen, silicon additives, intumescent flame retardants, and nanoparticles have been proposed to overcome this challenging problem. Many phosphorous compounds are used in place of halogen compounds in flame retardant epoxy resins. Compared with flame retardant additives, reactive organic phosphorus compounds in epoxy resins show excellent flame retardant efficiency. In this paper, the classification of flame retardants (halogen, organic phosphorus compounds, minerals, nitrogen and silicon-based materials, intumescent flame retardant and nanocomposites), the combustion cycle of polymers and the application of flame retardants for epoxy resins, especially phosphorus-based materials, are investigated. Various flame retardant evaluation tests such as UL-94, limiting oxygen index and cone calorimetry are also briefly described.

## 1. Giriş

Halojenli alev geciktiriciler, özellikle brom bazlı inhibitörler, alev geciktiricide çok önemli bir rol oynamaktadır. Ancak çevresel kaygılar nedeniyle halojensiz alev geciktirici bileşiklere artan bir ilgi vardır. Çok sayıda patent ve makale, halojen içermeyen alev geciktiricilere odaklanmıştır. Bu derleme makalesinde, polimerik malzemeler, özellikle epoksi reçineler için halojensiz alev geciktiricilerle ilgili son gelişmeler gözden geçirilmiştir.

Polimer katkı maddeleri arasında alev geciktiriciler önemli bir yer bulmuştur. Bu malzemeler, mobilya, tekstil, elektronik ekipman ve yalıtımda yanıcılık standartlarına ulaşmak için plastik ve tüketici ürünlerinde belirli özellikleri indüklemek için kullanılır. Alev geciktiriciler genellikle termoset, tekstil, alevlenmenin önlenmesi veya yayılmasını engelleyen kaplamalarda kullanılan kimyasallardır. 1970'lerin sonlarında bazı halojenli bileşikler (tri dibromopropil fosfat gibi) yasaklanmıştır. Son zamanlarda pentabromodifenil eter ve tetrabromo bisfenol A, Amerika Birleşik Devletleri'nde yasaklanmıştır. Alev geciktiricilerin tüketicileri tarafından pazarda halojen ürünlere alternatifler aranmaktadır. Bu nedenle, fosfor ve nitrojen bileşikleri gibi halojenli alev geciktiricilere alternatifler üzerine araştırmalar büyük ilgi görmüştür (Weil & Levchik, 2004).

## 2. Alev Geciktirici Türleri

### 2.1. Halojen bazlı alev geciktiriciler

Bu grup, klorheksidin türevleri ve klorlu parafin gibi klor bileşiklerini, dekabromodifenil eter, deka bromo difenil etan gibi organik brom bileşikleridir. Halojenli organik bileşiklerin (brom içeren tüm alev geciktirici bileşikler dahil) kullanımı dünya çapında yasaklanmıştır. Halojen alev geciktiricilere alternatif bulmanın zorlukları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

1. *Halojen inhibitörlerinden daha az alev geciktiricidirler:* Brom içeren alev geciktirici bileşiklerin ağırlıkça %10'u, mineral alev geciktiricilerin ağırlıkça yaklaşık %30'una eşdeğerdir.
2. *Maliyetleri yüksektir:* Mineral alev geciktiriciler daha ucuzdur. Ancak, çok fazla yüklemeye ihtiyaçları vardır. Öte yandan, çoğu yeni halojensiz alev geciktiriciler daha maliyetlidir. Bromlu alev geciktiricilerin fosfor bazlı, halojensiz alev geciktirici bileşiklere oranı ve halojensiz, fosforsuz alev geciktirici bileşiklere oranı sırasıyla yaklaşık 6:1 ve 2:1'dir.
3. *Termal kararlılıkları yüksektir:* Birçok halojen alev geciktirici, yüksek sıcaklıklarda bozulur.
4. *Damlayan eriyik oluşturlar:* Polietilen, polipropilen, polietilen tereftalat ve akrilonitril bütadien stiren gibi birçok polimer için eriyik damlaması meydana gelir. Yanıcı damlalar ikinci bir tutuşma kaynağı görevi görür. Alev geciktiriciler yanıcı olmayan damlacıklar üretmelidir.
5. *Mekanik özelliklerin azalmasına sebep olur:* Artan alev geciktirici miktarı ile mekanik özelliklerdeki azalma artar. Bu nedenle, daha az verimli alev geciktiricilerle mekanik özellikleri kaybetme olasılığı daha yüksektir (Betts, 2008; Van der Veen & Boer, 2012).

### 2.2. Organik fosfor bileşikleri

Bu grup, trifenil fosfat gibi organik fosfat bileşiklerini (TPP), resorsinol bis(difenil fosfat) (RDP), bisfenol difenil fosfat (BADP), trikresil fosfat (TCP), dimetil metil fosfonat gibi fosfonatlar (DMMP) ve alüminyum dietil fosfinata gibi fosfinatlar içerir (Schartel, 2010).

Fosforlu alev geciktiriciler, bir dizi inorganik/organik bileşik ve polimerlerin yapısına kimyasal bağlarla bağlanan reaktif bileşiklerin yanı sıra sadece polimerlerle fiziksel karıştırma yoluyla birleşen katkı maddelerini içerir. En önemli fosforlu alev geciktiriciler fosfat esterleri, fosfonatlar ve fosfinatlardır. Fosforlu alev geciktiriciler, mühendislik plastiklerinde, poliüretan süngerlerde, termosetlerde, kaplamalarda ve tekstillerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fosfat esterleri alev geciktirici olarak esas polivinil klorürde, alkil veya aril fosfatlar ve mühendislik plastikleri, özellikle poli (fenilen oksit), darbeye dayanıklı polistiren (HIPS / PPO), polikarbonat - akrilonitril bütadien stiren (ABS / PC), trifenil fosfat, risokinol ve bisfenol A-bis (fenil) fosfat gibi polikarbonat (PC)



kullanılır. İkinci bileşik, yüksek düzeyde alev geciktirici gerektiren bilgi teknolojisi ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer uygulamalar fenolik reçineleri ve kaplamaları içerir.

Fosfatlar, fosfonatlar ve fosfitler, otomobil ve binalarda kullanılmak üzere esnek poliüretan süngerlerde reaktif fosfor alev geciktirici olarak kullanılmaktadır. Katkılı organik fosfonatlar, özellikle poliamidlerde kullanım için yeni bir alev geciktirici sınıfıdır. Polyester elyaflarda özel fosforlu alev geciktiriciler kullanılmaktadır. Ayrıca, baskılı devre kartlarında epoksi reçinelerinde reaktif organik fosfor bileşikleri kullanılabilir. Kırmızı fosfor bazlı alev geciktiriciler esas olarak cam elyaflar ile güçlendirilmiş poliamid 6 ve poliamid 66'da kullanılır. Bu bileşiklerin çoğu uygulama alanları polietilen, etilen vinil asetat (EVA), poliüretan köpük ve termoset reçinelerdir (doymamış polyesterler ve epoksiler gibi). Alüminyum polifosfatlar şişebilen kaplamalarda, sert ve esnek poliüretan süngerlerde, poliolefinlerde, doymamış polyester formülasyonlarında, fenollerde, epoksilerde ve tekstil kaplamalarında kullanılır (Kozłowski & Władyska-Przybylak, 2008). Bu grubun inhibitörleri, tutuşma bölgesinde bir kül tabakası veya konsantre pirofosforik asit oluşturarak yanan polimerin kaynamasını ve oksijenin alt tabakaya geçmesini engeller (Levchik & Weil, 2004).

### 2.3. Mineral alev geciktiriciler

Alüminyum ve magnezyum hidroksitler, beyaz çamur (huntit) ve hidromanyezit mineral alev geciktiricilerdir. Alüminyum trihidroksit (ATH) ve magnezyum hidroksit (MDH) en yaygın kullanılan alev geciktiricilerdir (Qian ve ark., 2014). Çalışma prensipleri, su salınımı ile polimerin soğutulmasına dayanır. MDH, 310°C civarındaki sıcaklıklarda kararlı olduğu için, daha yüksek işlem sıcaklığına sahip polimerlerde kullanılırken, ATH 210°C'de ayrışır.

Alüminyum hidroksit alev geciktiriciler (beyaz toz), teller ve kablolar, elektrikli ve elektronik ekipmanlar, yapı malzemeleri, nakliye, boyalar, gofretler ve kağıtlar için yaklaşık 210°C'ye kadar olan proses sıcaklıklarında kullanılmaktadır. Magnezyum hidroksit alev geciktiriciler (beyaz toz) yaklaşık 310°C'ye kadar olan proses sıcaklıklarında teller, kablolar, poliamid bazlı elektrik-elektronik ekipmanlar ve yapı malzemeleri için kullanılmaktadır (Rothon & Hornsby, 1996).

Alev geciktirici etkiler gösteren ve ticari uygulamalarda kullanılan başka malzemeler de vardır. Bunlar alev geciktiricilerin etkinliğini arttırmak veya duman oluşumunun bastırılması, kül oluşumunun artırılması gibi özel etkiler için kullanılırlar. Örneğin boratlar, selüloz için alev geciktirici olarak borik asit ve boraks karışımı halinde, poli (vinil klorür), poliolefinler, elastomerler, poliamidler ve epoksi reçineler gibi diğer plastikler için borat kullanılır. Halojenli sistemlerde antimon oksit ile borat, halojensiz sistemlerde ise alüminyum trihidroksit ile magnezyum hidroksit veya kırmızı fosfor kullanılır. Bazı özel uygulamalarda son ilave olarak borat kullanılabilir. Bor içeren bileşikler, suyu serbest bırakarak ve yüzeyi koruyan bir cam kaplama tabakası oluşturarak çalışır. Çinko bileşikleri ise (hidroksi stanit çinko) ilk olarak poli (vinil klorür) için duman bastırıcı olarak geliştirilmiştir. Daha sonra kül oluşumunu hızlandırarak bazı plastiklerde alev geciktirici olarak hareket edebilecekleri keşfedilmiştir. Talk ve alçıtaşı (kalsiyum karbonat) gibi diğer mineral dolgu maddeleri bazen alev geciktiriciler olarak kullanılır. Karışımdaki polimer miktarını ve dolayısıyla yanıcı madde miktarını azaltarak çalışırlar (Hollingbery & Hull, 2010; Hull ve ark., 2011; Luhar ve ark., 2021).

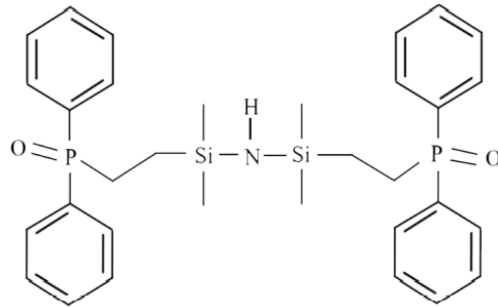
### 2.4. Azot bazlı alev geciktiriciler

Azot bileşiklerinin, çevre dostu alev geciktiriciler olarak kullanımı hızla büyümektedir. Günümüzde ana uygulamaları esnek poliüretan süngerlerde melamin; naylonlarda, melamin siyanürat; poliolefinlerde melamin fosfatlar, melamin; şişen boyalarda disiyandiamid, guanidin fosfatlar tekstilde; guanidin sülfamid ise duvar kağıtlarında bulunur. Azot bazlı alev geciktiricilerin ana avantajları, düşük toksisiteleri ve katı hallerinin yanı sıra dioksin, halojenli asitlerin olmaması ve yangın sırasında duman yayılmamasıdır. Bu inhibitörlerin etkinliği halojenli bileşikler, alüminyum trihidrat ve magnezyum hidroksit arasındadır. Metal hidroksitler suyu serbest bırakır ve çevre dostudur, ancak düşük aktiviteleri, polimer matrisinin mekanik özelliklerini değiştiren yüksek yük konsantrasyonları ile telafi edilmelidir. Birçok halojenli bileşik ile karşılaştırıldığında, azot bazlı alev geciktiriciler, polimerik malzemeye eklenen stabilizatörlere müdahale etmez.

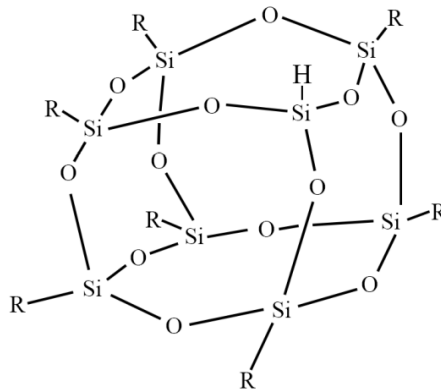
Geri dönüştürülebilirlik günümüzde çok önemli bir konu haline gelmiştir. Azotlu alev geciktiriciler yüksek bozunma sıcaklıklarına sahip olduğundan, bu alev geciktiriciler geri dönüşüm için uygundur. Kablo kılıfı alanında, bu tür inhibitörler yanma sırasında çok az aşındırıcı gazlar açığa çıkarır ve elektrik tesisatlarına zarar vermez. Azot bazlı alev geciktiriciler çevre dostudur çünkü poliüretan, naylon ve akrilonitril bütadien stiren gibi polimerlerin yapısına yeni elementler eklemesler. Atık bertarafı açısından bu tür inhibitörler azot ve fosfor gibi önemli elementlerin varlığından dolayı gübrelerle uyumludur. Azot bazlı alev geciktiriciler metal hidroksitlerden daha etkilidir (Horrocks & Price, 2008).

## 2.5. Silikon bazlı alev geciktiriciler

Silikon bazlı alev geciktiriciler, yanma sırasında koruyucu yüzey kaplamalarının üretilmesi nedeniyle açığa çıkan ısı miktarını azalttığı için potansiyel alev geciktirici özelliklere sahiptir. Fosfor, nitrojen ve silikon içeren düşük maliyetli alev geciktiriciler de sentezlenmiş, LOI değeri %18'den %27'ye yükselmiştir (Zhou ve ark., 2015). Alev geciktirici (1,1,3,3-tetrametil-1,3-disilazandiil)di-2,1-etan-diil]bis(difenilfosfin oksit) (PSiN) sentezlenmiş ve epoksi kompozite ağırlıkça %20 PSiN ekleyerek UL-94 testinde V-0 derecesi (Polimerin yanmazlık sınıfını ifade eder, Bölüm 6.1'de detaylı olarak incelenmiştir) elde edilmiştir. Polimerin düşük yüzey enerjisi nedeniyle silika, polimer yüzeyine göç etme eğilimindedir. Azot bileşenleri yanma işleminde gaza dönüştürülür. Fosfor bileşenleri hem yoğun hem de gaz fazlarında alev geciktirici görevi görür. Sonuçlara göre, bu üçlü alev geciktirici N-Si-P'nin epoksi kompozitte iyi performans göstermiştir (Li ve ark., 2014). Şekil 1, PSiN'nin kimyasal yapısını göstermektedir. Son zamanlarda, silikon içeren moleküller, özellikle çok yüzü oligomerik silseskioksan (POSS), mükemmel güçlendirici etkileri nedeniyle halojensiz alev geciktiriciler olarak başarıyla kullanılmıştır (Dasari ve ark., 2013). Şekil 2, silseskioksanın çok yönlü oligomer görüntüsünü göstermektedir (POSS).



Şekil 1. PSiN'nin kimyasal yapısı.

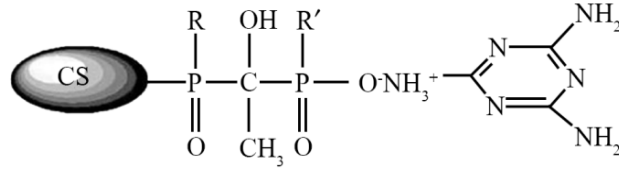


Şekil 2. Çok Yüzlü Oligomerik Silseskioksan (POSS).

## 2.6. Şişen alev geciktiriciler

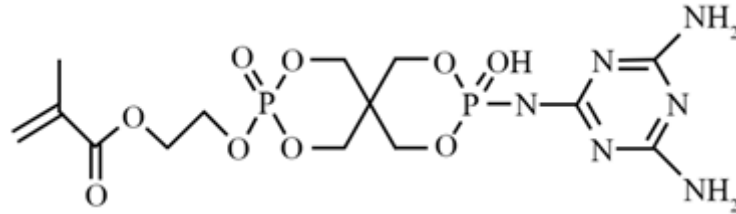
Şişme (intumescence), alttaki tabakaları ateşten veya ısıdan koruyan yanan bir polimerin yüzeyinde oluşan bir kül ve sünger kombinasyonunun sonucudur. Şişen alev geciktiriciler genellikle yüksek seviyede alev geciktirici gerektiren uygulamalarda kullanılır. Şişen alev geciktiriciler çok etkilidir ve düşük toksisiteye sahiptir. Bu malzemeler alev karşısında güvenliği ve güçlü alev geciktirici işlevi sağlar. Karbon ajanları, yumuşak veya sert olabilen çok katmanlı kül yüzeyleri oluşturur (Xiao ve ark., 2014). Şişen alev geciktiriciler, yanma işlemi sırasında halojen tipi olanlara göre daha az zehirli duman ve gaz üretir (Bahreyni ve ark., 2017).

Şişen yanıcı alev geciktiriciler, karbon kaynaklarından (pentaeritritol), asit kaynağı (amonyum polifosfat), gaz üfleme katkı maddeleri (melamin) gibi, sodyum silikatlar ve grafitten oluşan kömür yanıcı alev geciktiricilerden oluşur. Bu malzemeler yangına dayanıklı plastik boruların yanı sıra çelik dış yüzeyler için de uygundur. Pentaeritritol yüksek maliyetli bir maddedir ve ona uygun bir alternatif kitosandır. Kitosan/Üre bileşiği bazlı fosfonik asit melamin tuzu (HUMCS) kombinasyonu eklendiğinde iyi bir sinerjik etki görülür. Şekil 3, HUMCS'in yapısını göstermektedir (Dorieh ve ark., 2022).



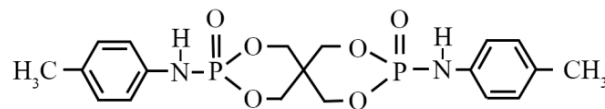
Şekil 3. HUMCS'in kimyasal yapısı.

Şişen ajan, 2-((9-[(4,6-diamino-1,3,5-triazin-2-il)amino]-3,9-dioksido-2,4,8,10-tetraoksa-3,9-difosfaspiro[5,5]undekan-3-il oksietil metakrilat (EADP), fosfor oksiklorür, pentaeritritol, hidroksietil metakrilat ve melamin'den üç aşamalı reaksiyon yoluyla sentezlenmiştir. EADP, termal stabilite ve polipropilenin gerilme mukavemetini olumsuz etkilemeden mükemmel kül oluşturma kabiliyeti gösterir. Şekil 4, EADP'nin kimyasal yapısını göstermektedir (Li ve ark., 2014).



Şekil 4. EADP'nin kimyasal yapısı.

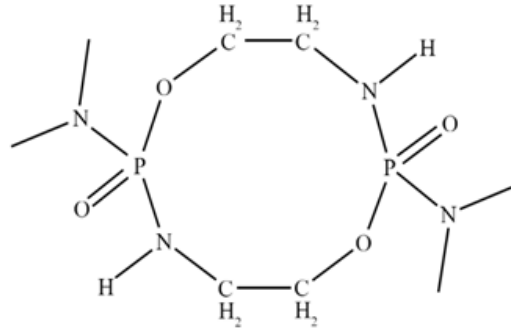
Sert poliüretan köpük (RAUF) oldukça yanıcıdır ve yandığında zehirli gazlar yayar. Geleneksel şişen alev geciktiriciler, poliüretan sert sünger matrisi ile pek uyumlu değildir. Toluidin spirosiklik pentaeritritol bisfosfonat (TSPB) adı verilen fosfor ve azot içeren yanıcı alev geciktirici, daha iyi uyumluluk, daha az mekanik özellikler üzerinde olumsuz etki ve yumuşak kül oluşumu göstermiştir (Zhao ve ark., 2017). TSPB'nin kimyasal yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. TSPB'nin kimyasal yapısı.

Oktahidro-2,7-di(N,N-dimetilamino)-1,6,3,8,2,7-dioksadiazadifosfesin (ODDP) sentezlenerek, mükemmel alev geciktiricilik gösteren poliüretan yapıya dahil edilmiştir. Ağırlıkça %15 ODDP

ekleyerek UL-94 testinde LOI değeri %30.6 ve V-0 değerine sahip ODDP içeren poli üretan elde edilmiştir (Gu ve ark., 2015). ODDP'nin kimyasal yapısı Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. ODDP'nin kimyasal yapısı.

## 2.7. Nano kompozitler

Nanokompozitler, nanoparçacık boyutlarından birinin 100 nm'den küçük olduğu çok fazlı katılardır. Silikatlı nanokompozitlerdeki silikat, mekanik özellikleri ve ısı transfer sıcaklığını (HDT) artırır, termal kararlılığı iyileştirir, gaz-buhar geçirgenliğini ve yanıcılığı azaltır (Gilman, 1999; Ray & Okamoto, 2003). Polipropilen, poliamid 6 ve poliamid 66 gibi polimerler için alev geciktirici olarak montmorillonit ile fosfor-azot alev geciktirici kullanımı sinerjik bir etkiye sahiptir (Akindoyo ve ark., 2016).

Polyester eter elastomerler kolayca tutuşur ve çabuk yanar. Polyester eter elastomer nanokompozitler, fosfor-azot alev geciktiriciler ve organik montmorillonit ile eriyik karıştırma yöntemi ile hazırlanmıştır. Sonuçlar, UL-94 testinde V-0 değeri elde eden bu kompozitte çok iyi bir alev geciktirici etki yaratıldığını göstermiştir (Zhong ve ark., 2014). Nanomalzemelerin polimerlerde kullanılması, temel malzemenin yanıcılığını büyük ölçüde azaltır. Son araştırmalar, nanoparçacıkların geleneksel alev geciktiricilerle (şişen alev geciktiriciler gibi) veya yüzey operasyonlarının (plazma gibi) birleştirilmesinin yanıcılığı etkili bir şekilde azalttığını göstermiştir. Polimerik nano kompozitler kullanıldığında, az miktarda katkı maddesi kullanılabilir, polimerin damlaması ve akması azalır.

## 3. Epoksi Reçinede Alev Geciktiricilerin Kullanılması

Epoksi reçineler, mekanik mukavemeti, yüksek modülü, mükemmel yapışması, kimyasal ve elektriksel direnci, korozyon direnci ve iyi işlenebilirlik özellikleriyle en yaygın kullanılan polimerlerden biridir. Bu malzemeler elektrik-elektronik ekipman ve endüstrilerinde elektrik yalıtımı, yarı iletken kapsüllerde, ön kaplamalar, yapıştırıcılar, baskılı devre kartları, yüzey kaplamaları, tarım, havacılık, gemi yapımı, ulaşım ve polimer kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Liu & Liang, 2017; Mozaffari & Beheshty, 2018; Niazi & Beheshty, 2019). Hidrokarbonlar polimerlerin yapısının büyük kısmını oluşturduğundan, çoğu polimer ateşe maruz kaldığında hızla yanar. Zayıf alev direnci, özellikle yüksek alev dayanımı gerektiren alanlarda uygulamalarını geniş ölçüde sınırlayan geleneksel epoksi reçinelerinde temel bir sorundur. Bu nedenle epoksi reçinelerde alev geciktiriciliğin geliştirilmesi çok önemlidir.

Epoksiler, sertleşmek için kürlenme maddesi adı verilen ikinci bir bileşen gerektiren termoset sistemleridir. Epoksi reçinelerin kürlenme maddeleri veya sertleştiricileri, uygulama ve özelliklerinde önemli bir rol oynar; reçinelerin farklı özellikleri sertleştiricilerden etkilenir. Genel olarak, epoksi kürlenme ajanları ısıl kürlenme ve gecikmeli kürlenme olarak iki gruba ayrılabilir. Ortam sıcaklığında bile çapraz bağlama reaksiyonları gerçekleştirmek için reçineye geleneksel sertleştirme ajanlarının eklenmesi viskozitede kademeli bir artışa neden olur. Son olarak reçine jelleşir ve sertleşir. Ancak kullanılan sertleştirici geciktirici türde ise, ortam sıcaklığında reçine ilave edildikten sonra gecikmeli kürlenme maddeleri reaksiyona girmez ve karışımın viskozitesi değişmez (Zhang ve ark., 2022). Bu nedenle, tek bileşenli karışımlar hazırlamak için epoksi reçinelerde kullanılır. Bu sertleştirme maddeleri normal koşullar altında aktif değildir ve reçine ile reaksiyona girmez. Ancak, ışık veya ısı

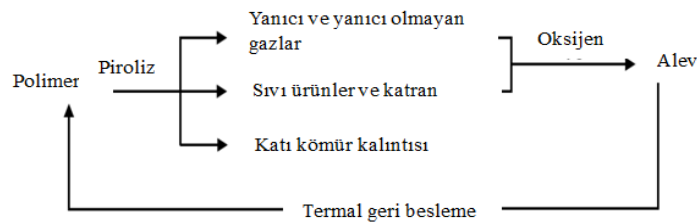
gibi dış uyarıların uygulanmasıyla aktive edilirler. Bu sertleştirme ajanları arasında gecikmeli aktif hidrojen ajanları, gecikmeli katalitik ajanlar, kimyasal korumalı ajanlar ve mikrokapsüllü ajanlar yer alır (Ullah ve ark., 2014; Mozaffari & Beheshty, 2018; Zhang ve ark., 2022).

Katkı maddeleri ve reaktanların kullanımı dahil olmak üzere, epoksi reçinelerinde alev geciktiriciliği elde etmek için iki yaklaşım vardır. Alev geciktirici özelliklere sahip katkı maddeleri, polimer bileşenlerine kimyasal bağ olmadan fiziksel olarak eklenen malzemelerdir. Reaktif maddeler ise polimer matrislerle kimyasal bağ oluşturma yeteneğine sahiptir (Sonnier ve ark., 2016). Son zamanlarda, birçok avantajından dolayı reaktif alev geciktiriciler çok dikkat çekmektedir. Reaksiyon yöntemi daha kararlı bir etki sağlar çünkü reaktif alev geciktiriciler, polimer yapısı içinde kimyasal olarak birleştirilir. Böylece reaktif alev geciktiriciler proses sırasında veya yüksek sıcaklık uygulamalarında yüzeye göç etmezler. Ek olarak, aynı miktarda alev geciktirici etki oluşturmak için katkı maddelerine göre daha az reaktif alev geciktiriciye ihtiyaç vardır. Ayrıca, insan sağlığı ve çevre konularına artan ilgi, özellikle fosforla reaktif alev geciktiriciler olmak üzere halojen içermeyen katkı maddelerine dikkat çekmiştir (Lu & Hamerton, 2002). Epoksi reçinelerde, alev geciktirici etki sağlayan fosforlu kimyasal birim, epoksi reçinesi, normal veya gecikmeli çapraz bağlama maddesi bulunabilir. Aşağıda, polimerlerin yanma döngüsü ve fosforlu alev geciktiricilerin etki mekanizması kısaca incelenmiş, ardından epoksi alev geciktirici türleri tanıtılmıştır.

#### 4. Polimerlerin Yanma Döngüsü ve Fosforlu Alev Geciktiricilerin Etki Mekanizması

Polimer ısı kaynağına maruz kaldığında, yüzey sıcaklığı kademeli olarak piroliz sıcaklığına ( $T_p$ ) ulaşana kadar yükselir. Bu sıcaklıkta polimer, sıvı ürünler ve bazı kömür katıları için yanıcı ve yanıcı olmayan gazlar oluşturmak üzere pirolize edilir. Yanıcı gazların oksijen veya ortam havası ile karıştırılmasıyla yanıcı bir gaz karışımı oluşur. Bu gaz halindeki karışım, sıcaklığın daha da artmasıyla yanma sıcaklığına ( $T_c$ ) ulaşır. Böylece yanma reaksiyonunun aktifleşme enerjisini sağlayarak patlayabilir. Oluşabilecek bir diğer durum ise harici bir kaynağın (kıvılcım veya alev gibi) yakınında düşük bir sıcaklıkta (parlama noktası) tutuşmasıdır. Polimerin yanmasından açığa çıkan ısı, polimerin pirolizi sürekli devam edecek şekilde ise, gerekli yanıcı gaz konsantrasyonu sağlanır ve yanma devam eder.

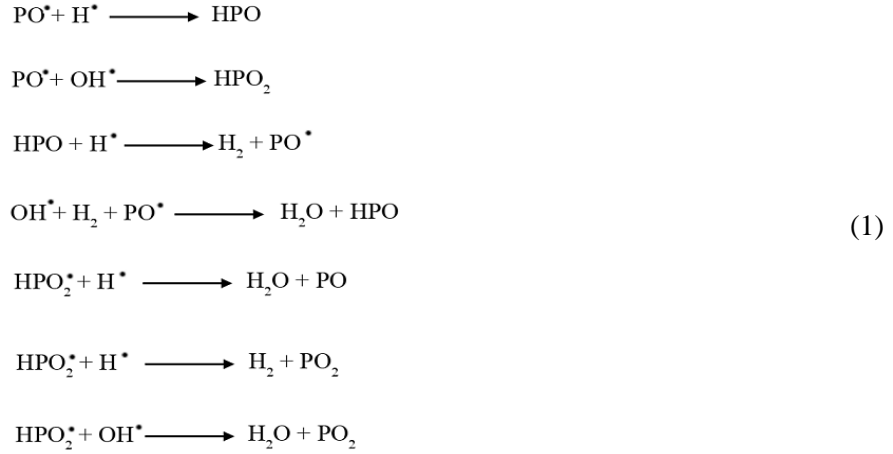
Polimeri yakmak için üç faktör yakıt (pirolizden salınan yanıcı gazlar), ısı (harici bir kaynaktan gelen ısı veya yakıt oksidasyonundan salınan ısı) ve oksijen (havada) gereklidir. Alev geciktiricilik, döngünün tekrar etmesi veya kesintiye uğratılmasıyla sağlanabilir (Rahimi-Aghdam & Shariatnia, 2018). Şekil 7, polimerlerin yanma döngüsünü göstermektedir.



Şekil 7. Polimerlerin yanma döngüsü.

Alev geciktiriciler, fiziksel, kimyasal veya ikisinin birlikte kullanımıyla çalışır. Alev geciktirici fiziksel olarak çalıştığında, ısı tuzağı yoluyla, yakıtı seyrelterek veya dayanıklı bir tabaka oluşturarak etki eder. Isı tuzağı durumunda, alev geciktiriciler polimerin maruz kaldığı büyük miktarda ısıyı emer. Yakıt seyreltme durumunda, alev geciktiriciler, yanıcı olmayan gazlar üreterek yanıcı gazları seyreltirken dirençli bir tabaka oluşturma durumunda, bu malzemeler polimer yüzeyinde kül veya bir gaz tabakası oluşturarak hareket eder. Alev geciktirici, yoğun fazda (polimer yüzeyinde katı veya erimiş faz) veya gaz halinde (buhar) olabilir (Baby ve ark., 2020). Kimyasal olarak çalışan, fosforlu alev geciktiriciler, gaz fazında halojenli alev geciktiricilerle hemen hemen aynı şekilde çalışırlar. Bu durumda hidrojen (H) ve hidroksi (OH) radikalleri daha az verimli radikallerle değiştirilir veya gaz fazında yeniden birleştirilir (Chattopadhyay & Webster, 2009). Denklem 1 (Green, 1996), fosforlu alev geciktiricilerde meydana gelen bir dizi ana reaksiyonu göstermektedir.



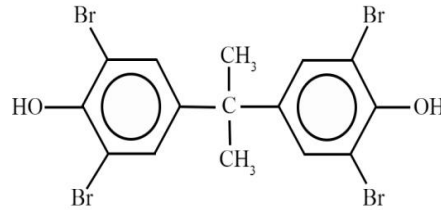


Gaz fazındaki zincirleme reaksiyonlar yavaşlar veya kesintiye uğramasıyla ısı üretimini azaltır. Bu duruma alev bastırma denir. Gaz fazındaki fosforun etkinliğinin HBR gibi hidrojen halojenürlerinkine benzer veya ondan daha fazla olduğu bildirilmiştir. PO radikalının önemli bir rol oynadığına dair bir görüş bulunmaktadır (Green, 1996; Chattopadhyay & Webster, 2009). Daha önce belirtildiği gibi, alev geciktirici gaz halinde, yoğun fazlar veya her ikisinin karışımı yoluyla çalışabilir. Alev geciktiricinin çalışma mekanizmasını anlamak için bir kez N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> ve sonrasında N<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>O ile deneme yapılır. Alev geciktiricide önemli bir değişiklik gözlenmezse, alev geciktiricinin yoğun faz boyunca gerçekleştirildiği sonucuna varılabilir (Rahimi-Aghdam & Shariatnia, 2018).

## 5. Epoksi Reçineler için Alev Geciktiriciler

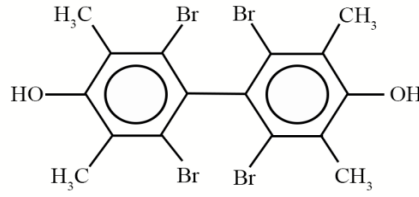
### 5.1. Halojen alev geciktiriciler

Epoksi reçineler için halojen alev geciktiriciler genellikle fenollerdir. Bromlu fenoller, epoksi reçinesi ile reaksiyona girer ve brom, polimer matrisinin bir parçası haline gelir. Bu konuda en çok diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) ve tetrabromobisfenol A (TBBA)'dan elde edilen ürün kullanılmıştır. TBBA, epoksi reçinelerinde özellikle alev geciktiricinin zorunlu olduğu elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan benzersiz bir reaktif alev geciktiricidir. Tipik olarak, TBBA, geleneksel bir zincir genişleme reaksiyonunda epoksi ile reaksiyona sokulur. V-0 derecesine ulaşmak için ağırlıkça %20 ila %30 TBBA kullanılır (Wang ve ark., 1991). Şekil 8, TBBA'nın kimyasal yapısını göstermektedir.



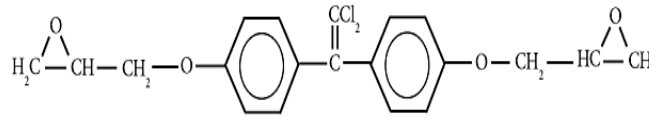
Şekil 8. Tetra bromobisfenol A'nın kimyasal yapısı.

2,2'6,6'-tetrabromo-3,3',5,5'-tetrametil-4,4'-bisfenol, yüksek termal kararlılıkla sentezlenir ve epoksi reçine sistemleri içinde reaksiyona girer. Elektronik bileşenlerin kaplanması veya kapsüllemesi uygulamalarında, geleneksel epoksi reçinelerine kıyasla daha yüksek bir termal kararlılığa sahip olan bu tip bisfenol A kullanılır. Bu özellik, alev geciktirici baskılı devre kartları için şişme dirençli yüksek camısı geçiş sıcaklığına yol açar (Wang ve ark., 1991). 2,2'6,6'-tetrabromo-3,3',5,5'-tetrametil-4,4'-bisfenol kimyasal yapısı Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. 2,2',6,6'-tetrabromo-3,3',5,5'-tetrametil-4,4'-bisfenol.

Birkaç farklı kürlenme maddesiyle kürlenmiş diglisidil eter 1,1-dikloro-2,2-bis (4-hidroksifenil) etilenin (DGEBC) yanıcılık ve mekanik ısı özellikleri, diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) ile kıyaslanmıştır. DGEBA ve DGEBC'nin mekanik özellikleri aynıdır. Ancak DGEBC, DGEBA'ya kıyasla daha fazla alev geciktirici özelliği, %50 daha az ısı yayılımı ve ısı kapasitesi gösterir. Metilen di anilin ile kürlenmiş DGEBC %30 LOI ve UL-94'de V-0 özelliğini göstermiştir. Bu bileşiğin mükemmel alev geciktirici etkinliği, benzersiz kömür oluşum mekanizmasına bağlanmıştır (Walters & Lyon, 2008). Şekil 10'da diglisidil eter 1,1-dikloro-2,2-bis (4-hidroksifenil) etilenin kimyasal yapısı gösterilmiştir. Uygun bir alev geciktirici özelliğe sahip olmak için bromlu reçinelerin %16-22 brom içermesi gerekir. Bu maddeler, yanma nedeniyle sorunlara neden olabilen hidrojen bromür, bromlu polidibenzodiaksin veya dibenzofuran gibi toksik dumanlar ve aşındırıcılar üretebilir. Halojenli alev geciktiriciler, epoksi reçinelerin yanıcılığını azaltmada oldukça etkili iken, insan sağlığı ve çevre sorunları nedeniyle bu malzemelerin çeşitli endüstrilerde kullanımının azaltılması ve yerine fosforlu alev geciktiricilerin kullanılması imalat sanayi gündeminde yer almaktadır.



Şekil 10. Diglisidil eter 1,1-dikloro-2,2-bis (4-hidroksifenil) etilenin kimyasal yapısı.

## 5.2. Fosforlu alev geciktiriciler

### 5.2.1. Fosfor katkı maddesi

Fosfor bileşikleri, monomer ve katkı maddesi olarak kullanılan önemli bir alev geciktirici ailesidir. Fosforlu bileşiklerin en önemli özelliği, küçük miktarlarda kullanıldığında bile kabul edilebilir bir etkiye sahipken polimer matrisinin özellikleri üzerinde nispeten olumsuz bir etkiye sahip olmamasıdır. Öte yandan bu malzemeler halojen alev geciktiricilere göre insan ve çevre sağlığı açısından daha az zararlıdır. Fosforlu alev geciktiricilerin yelpazesi çok geniştir çünkü fosfor farklı oksidasyon durumlarında bulunabilir. Fosfinler, fosfin oksitler, fosfonyum bileşikleri, fosfonitler, kırmızı fosfor, fosfitler ve fosfatların tümü alev geciktirici olarak kullanılır. Bu bileşikler, genellikle, kalan karbon veya kül miktarını artırarak yoğun fazda alev geciktirici etki sergiler. Kül oluşumu için iki mekanizma vardır:

1. O<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> yerine karbon üreten reaksiyonlar lehine ayrışma da dahil olmak üzere kimyasal reaksiyonların yeniden yönlendirilmesi,
2. Koruyucu kömürün yüzey tabakasının oluşumudur.

Halojensiz alev geciktiricilerin geliştirilmesinde bilimsel önemleri çok sayıda makalede ifade edilmiştir (Lu & Hamerton, 2002; Bourbigot & Duquesne, 2007). Kürlenmiş epoksi reçineleri yüksek konsantrasyonlarda OH gruplarına sahiptir (Levchik ve ark., 1995). Bu nedenle fosforlu alev geciktiriciler, OH gruplarıyla reaksiyona girme eğilimlerinin yüksek olması nedeniyle epoksi reçinelerinde çok etkilidir. V-0 derecesini elde etmek için gereken fosfor miktarı, kullanılan sertleştirme maddesinin tipine ve ayrıca sistemde dolgu maddelerinin bulunma durumuna büyük ölçüde bağlıdır. Epoksi reçinelerinin farklı uygulamaları için gereken fosfor miktarı değişir ve bir dizi test yapılarak her sistem için optimize edilmelidir (Chattopadhyay & Webster, 2009). Kırmızı fosfor,

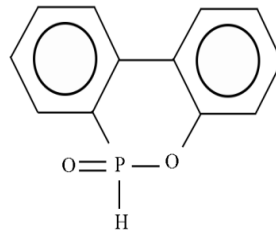
epoksi reçineler için çok etkili bir katkı maddesidir. Bu malzemenin uzun vadeli özelliklere sahip olması için stabilizasyona ihtiyacı vardır. Elektronik bileşenlerin paketlenmesine yönelik UL-94 testinde V-0 derecesini elde etmek için silika dolgululu kresol reçinesinde ağırlıkça sadece %5 kırmızı fosfor gereklidir (Pecht & Deng, 2006).

Amonyum polifosfat (APP), birçok epoksi reçine formülasyonunda kullanılabilir. Yanma sırasında düşük duman üretimi, amonyum polifosfat kullanmanın ana avantajlarından biridir. Amonyum polifosfat epoksi reçinelerde çok yüksek performans gösterir. Alifatik amin ile kürlenmiş epoksi reçinesinde %15 oranında bulunması LOI değerini %21 den %31'e yükseltmiştir. Amonyum polifosfat, endüstriyel ölçekli kablolama levhalarında alüminyum trihidrattan (ATH) daha yaygın olarak kullanılmıştır. Trifenil fosfat (TPP) ve alüminyum trihidratın, anhidritle kürlenmiş epoksi reçinesinin alev geciktiriciliği, termal stabilitesi üzerindeki etkisi, ısı kalorimetrisi ve LOI ile incelenmiştir. Beklentilerin aksine, alüminyum trihidrat, trifenil fosfat ve alüminyum trihidrat ve trifenil fosfat karışımının tümünün kürlenmiş reçine kül miktarını azalttığı bulunmuştur. Kül miktarının azalması, alev geciktirici etki için bu istenmeyen bir durumdur (Hergenrother ve ark., 2005).

Derouet ve ark. (1996), trimetil fosfat, trietil fosfat, triabutil fosfat ve trifenil fosfat gibi fosfor bileşiklerini katkı maddesi olarak içeren reçineler; bisfenol A diglisidil eter; önceden reaksiyona giren difenil gibi fosforun kimyasal bağ ile yapıya bağlandığı reçineleri ve dialkil ester fosfatı karşılaştırmıştır. Araştırmacılar, ana polimer zinciriyle kimyasal bağları olan numunelerin alev geciktirici davranışının katkılı numunelere göre daha yüksek olduğunu göstermiştir.

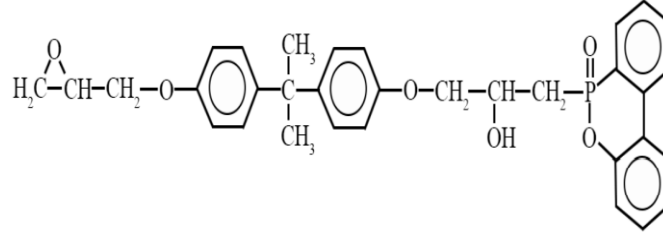
### 5.2.2. Epoksi sentezi için fosforlu monomerler

AG Siemens laboratuvarlarında diglisidil fosfatlar, diglisidil fosfonatlar ve diglisidil fosfinat kompleksleri hazırlanmıştır. Bu tür fosfonatlar ve fosfatlar, reçine ağında karıştırılmış ve ayrıca katkı maddeleri olarak aynı miktarda fosfor içeren fosfatlardan çok daha etkili olduğu bulunmuştur (La Rosa ve ark., 1999). 9,10-dihidro-9-oksa-10-fosfopenantrin-10-oksit (DOPO) kullanımı ile ilgili birçok makalede polietilen, poliamid, polivinil klorür, epoksi reçine ve akrilat epoksi reçine gibi çeşitli polimerlerde tartışılmıştır (Serbezeanu ve ark, 2021; Gao ve ark., 2015; Salmeia & Gaan, 2015; Gu ve ark., 2020; Levinta ve ark., 2020). Epoksi reçine ayrıca epoksi reçine ile önceden reaksiyona sokulabilir veya kürlenme işlemi sırasında reaktif katkı maddesi olarak kullanılabilir. P-H bağı epoksi grubuna eklenebildiğinden, bu reaksiyon hidrojen fosfonatları veya fosfinatları epoksi reçinesine bağlamak için kullanılabilir. Bu tür, DOPO reaktanlarının ticarileştirilmiş tek örneğidir. DOPO ile ilgili sorunlardan biri, tek faktörlü olmasıdır. DOPO ve kinon reaksiyonundan iki faktörlü bir fenolik ürün üretilir. Bu ürün, Tetra bermofenol A'ya benzer bir zincir reaksiyonu ile epoksi reçine yapısına dahil edilebilir. Bu malzeme iyi fiziksel özelliklere ve alev geciktirici seviyesine sahip olmasına rağmen, yüksek maliyeti nedeniyle yaygın olarak kullanılmamıştır (Salmeia & Gaan, 2015). DOPO'nun kimyasal yapısı Şekil 11'de gösterilmiştir.



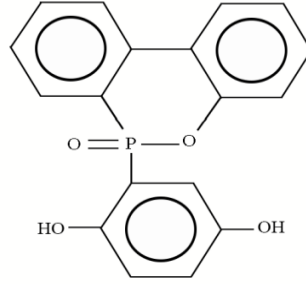
Şekil 11. 9,10-dihidro-9-oksa-10-fosfopenantrin-10-oksitin (DOPO) kimyasal yapısı.

DGEBA ile DOPO reaksiyonundan fosforlu epoksi reçineleri (% 1-3 fosfor) sentezlenmiştir. Fosfor miktarı arttıkça daha yüksek bir LOI değeri elde edilirken, 4,4-diamino difenil sülfon (DDS) ile kürlenmiş reçinelerin fosfor miktarı %0'dan %1.6'ya arttıkça, LOI değeri %22'den %28'e yükselmiştir (Wang & Lin, 1999a). Şekil 12, DOPO epoksi reçinesinin kimyasal yapısını göstermektedir. Reaktif fosfor difenol ve diglisidil eterden farklı epoksi eşdeğerlik ağırlıklarına sahip bir dizi gelişmiş epoksi reçinesi sentezlenmiş daha sonra DDS veya dissiamid ile kürlenmiştir.

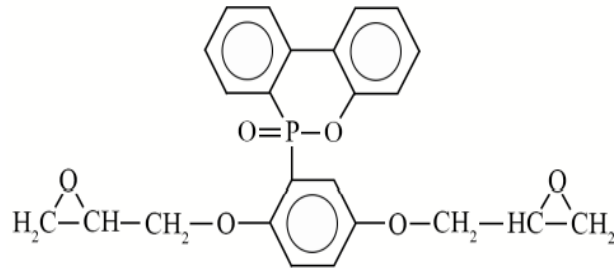


Şekil 12. DOPO içeren epoksi reçinenin kimyasal yapısı.

Sonuçlar, farklı miktarlarda fosfor içeren alev geciktiricili formülasyonların başlangıç sıcaklıklarının alev geciktirici içermeyen epoksilerle hemen hemen aynı olduğunu göstermiştir. 700 °C ve hava atmosferinde alev geciktirici içermeyen sistemde kül ürününün %1'den azı, fosforlu epoksilerde ise kül ürününün %10-18'i elde edilmiştir. Fosfor miktarı %0'dan %1.4'e yükseldikçe, LOI değeri %22'den %28'e yükselir. Fosfor miktarı %2.1'i aştığında LOI değeri sabit kalır. Elektronik ekipmanın kapsüllenmesi için epoksi formülasyonunda, %1 fosfor içeriği ile V-0 derecesine ulaşılabilirken brom kullanımında %2.7 brom ihtiyacı duyulur (Wang & Shieh, 1999; Wang & Lin, 2000). Şekil 13 ve 14, sırasıyla, reaktif fosfor içeren fenol ve diglisidil eterin kimyasal yapılarını göstermektedir. Diğer alev geciktirici epoksi monomerleri, difenolün (Şekil 13) DGEBA veya naftalin bazlı verimli epoksiler ile reaksiyonundan hazırlanmış ve tetra brom, bisfenol A ve (TBBA) gelişmiş epoksi reçineleri ile karşılaştırılmıştır. Alev geciktirici özelliklerin elde edilmesinde fosforun bromdan çok daha etkili olduğu bulunmuş, %2 oranında kullanılan fosforun veriminin %20 oranında kullanılan bromla eşdeğer olduğu görülmüştür.



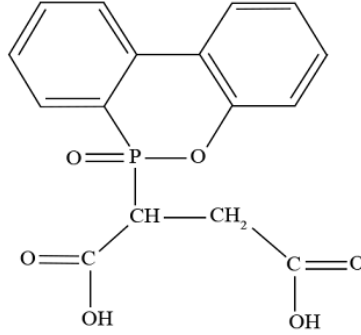
Şekil 13. Reaktif fosfor difenolün kimyasal yapısı.



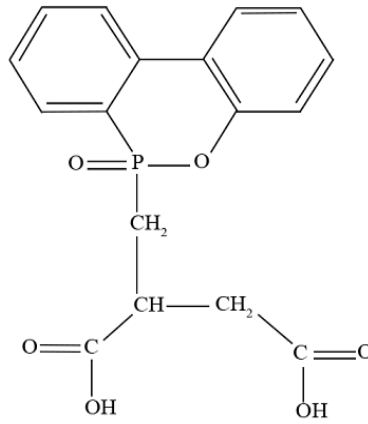
Şekil 14. Diglisidil eterin kimyasal yapısı.

Yüksek düzeyde çapraz bağlı reçineler için %1.4 fosfor veya %13.4 brom kullanımı ile V-0 derecesi elde edilebilir (Wang & Lee, 2000). DOPO reaksiyonundan maleik asit veya itakonik asit ile iki fosforlu diasit sentezlenmiş ve daha sonra iki gelişmiş epoksi reçinesini sentezlemek için diglisidil eter bisfenol A ile reaksiyona sokulmuştur. Sonuçlar, DDS ile kürlenennumunelerin bozunma sıcaklıklarının fosfor miktarı ile azaldığını, kül veriminin ise fosfor miktarı ile arttığını göstermiştir. Alev geciktirici özelliklere sahip her iki epoksi tipinde de %1.7 fosfor karıştırılması V-1

derecelendirmesi ile sonuçlanmıştır (Levchik ve ark., 2005). Şekil 15 ve 16, sırasıyla DOPO içeren maleik asit ve itakonik asidin kimyasal yapılarını göstermektedir.



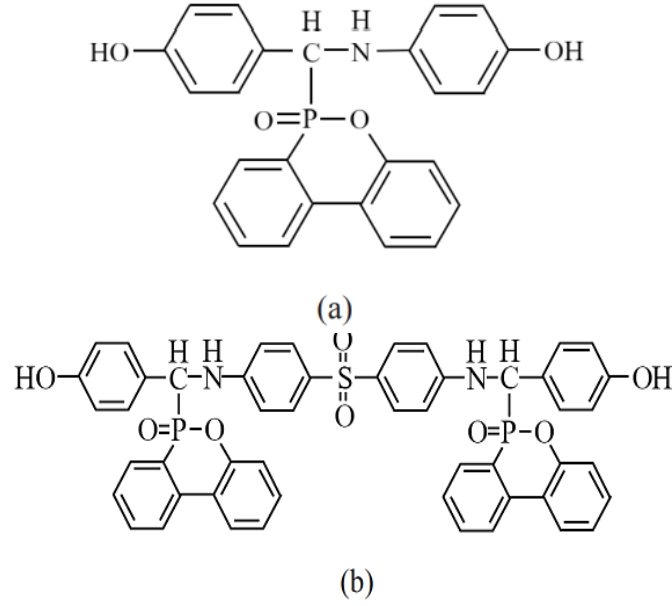
Şekil 15. DOPO içeren maleik asidin kimyasal yapısı.



Şekil 16. DOPO içeren itakonik asidin kimyasal yapısı.

Başka bir çalışmada, iki alev geciktirici, P-Ph ve P-DDS-Ph sentezlenmiştir (Şekil 17). P-DDS-Ph ile kürlenmiş reçineler P-Ph'a kıyasla daha iyi alev geciktirici özellikler göstermiştir. P-DDS-Ph ile kürlenmiş reçine için LOI değeri yaklaşık %33'e ulaşarak, daha iyi termal özellikler göstermiştir.  $T_g$  yaklaşık 224 °C olarak belirlenmiştir. P-DDS-Ph'nin, sentezlenen kürlenme ajanının, elektrik-elektronik ekipmanlarda kullanılmak üzere epoksi sistemlerde aktif alev geciktirici kürlenme ajanı olarak kullanıma uygun olduğu da tespit edilmiştir (Xiong ve ark., 2012).



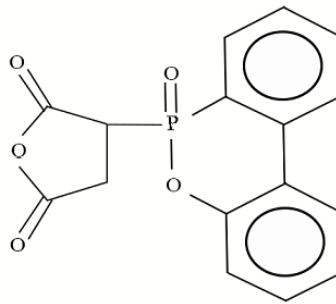


Şekil 17. Alev geciktirici olarak kullanılan (a) P-Ph ve (b) P-DDS-Ph'in kimyasal yapısı.

### 5.2.3. Fosforlu kürlenme maddeleri

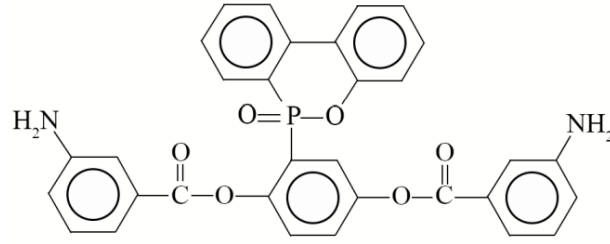
Epoksi polimerler gibi, fosfor grupları da sertleştirici madde yapısına dahil edilebilir. DOPO, Japonya ve Avrupa'da ticari olarak mevcuttur ve halojensiz alev geciktirici epoksiler için kürlenme sisteminin bir parçası olarak kullanılır. Fosfor içeriği %3'ten az olan DOPO içeren kompozit reçineler, V-0 UL-94 derecesine ulaşmıştır. Bu değer elektrik laminasyon gereksinimleri için yeterlidir. Bununla birlikte, konik kalorimetri kullanan bir çalışmada, havacılık uygulamalarında alev geciktirici gereksinimleri için bu miktarda fosforla tabakalaşma yeterli olmamıştır (Levchik & Weil, 2004).

Metil süksinik anhidrit, DOPO ile reaksiyona sokulmuş ve ürünü, DGEBA kürlenme işlemi için reaktif alev geciktirici olarak kullanılmıştır. Bu tip fosfinat anhidrit ile kürlenmiş epoksi reçineleri, ftalik anhidrit ve heksahidroftalik anhidrit gibi mevcut anhidritlerden daha yüksek LOI değerleri ve kül ürünleri göstermiştir (Cho ve ark., 1998). Bu reaksiyonun ürününün kimyasal yapısı Şekil 18'de gösterilmiştir.



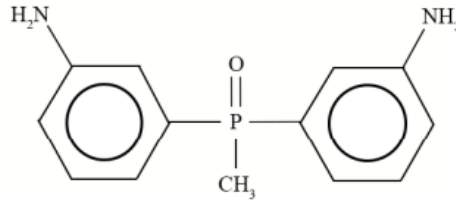
Şekil 18. Metil süksinik anhidrit ve DOPO'nun reaksiyon ürünü.

DGEBA, DOPO ve 3-nitrobenzoil klorürden sentezlenen fosforlu diamin ile kürlendi. Bu reçine, DDS ve DDM ile fırınlamış fosforsuz epoksilerle karşılaştırılmıştır. Epoksi fosforil kül ürünü 700 °C'de ve nitrojen varlığında %32 oranında iken DGEBA/DDM ve DGEBA/DDS için sırayla %13 ve %15 oranı elde edilmiştir. Bu sonuçlar LOI ölçümleriyle daha da doğrulanmıştır. DGEBA/DDM ve DGEBA/DDS'in LOI değeri sırayla %21-22 elde edilirken fosforlu epoksinin değeri %30 olmuştur. Yüksek kül ve LOI değerleri arasındaki ilişki, kürlenme maddesi olarak fosfor diamin kullanılmasıyla epoksi reçinelerin alev geciktiriciliğinin arttığı sonucu çıkarılır (Wang & Lin, 1999b). Şekil 19, bu fosforlu diaminin kimyasal yapısını göstermektedir.



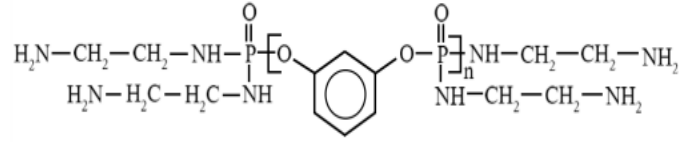
Şekil 19. Fosforlu diaminin kimyasal yapısı.

Chiu ve ark. (2002), iki grup DOPO içeren diaminleri sentezlemiştir. Fosfin oksit yapıları ısı olarak çok kararlı olduklarından, pişirme maddelerinde alev geciktirici özellikleri indüklemek için kullanılır. Naftalin ve Novalak epoksileri dahil olmak üzere çeşitli epoksi reçinelerinde siklik fosfin oksit kullanılmıştır. Birçoğu kompozit fosfor miktarı %1.5-2 olduğunda V-0 değerine ulaşılmıştır. Şekil 20'de kimyasal yapısı gösterilen ve bis amino fenil metil fosfin oksit (BAMPO) içeren birkaç bilimsel çalışma yapılmış, ısı ve yanma analizleri de gerçekleştirilmiştir (Levchik & Weil, 2004; Varma & Gupta, 1986; Kuo ve ark., 2001). Warma & Gupta (1986), DGEBA ve BAMPO bazlı cam elyaf takviyeli kompozitlerin DDS/DGEBA bazlı kompozitlere göre daha yüksek LOI değerleri gösterdiğini bildirmişlerdir. BAMPO ile kürlenmiş epoksi reçineler de DDS ile kürlenmiş sisteme kıyasla daha fazla kül ürünü göstermiştir. Fosforlu epoksi reçineleri, DDS ile kürlenmiş numunelere kıyasla söndürme özelliklerini sergilemesine rağmen DDS sistemde yanma kaynağı ortadan kalkana kadar devam etmiştir. Koni kalorimetri analizleri, fosfor konsantrasyonu arttığında ısı salma hızının düştüğünü göstermiştir.

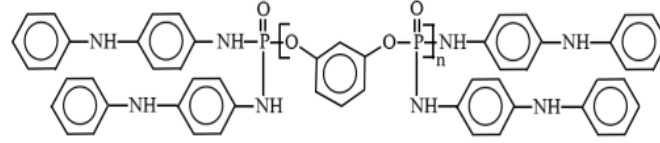


Şekil 20. Bis amino fenil metil fosfin oksitin kimyasal yapısı.

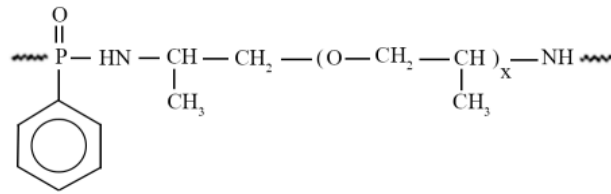
Aromatik grup içermeyen iki set fosforlu polialkilen amin, fosforil klorürün polieter aminler, etilen diamin ve N-fenil-1,4-fenil-N-diamin ile reaksiyona girmesiyle sentezlendi. Fosforsuz epoksi polimerlerin LOI değeri %18-21 iken fosfor numunelerindeki LOI değeri %22-31'dir. Daha aromatik ve fosfor gruplarına sahip bileşikler, daha yüksek LOI değerine yol açmıştır (Jeng ve ark., 2001). Şekil 21'de fosforlu polialkilen aminin kimyasal yapısı gösterilmiştir.



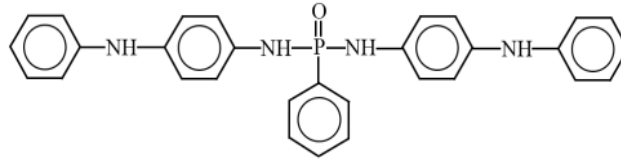
(a)



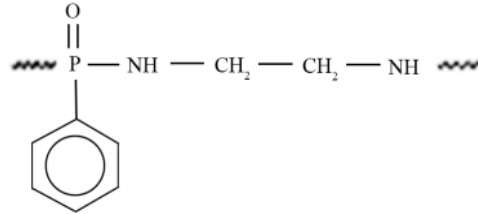
(b)



(c)



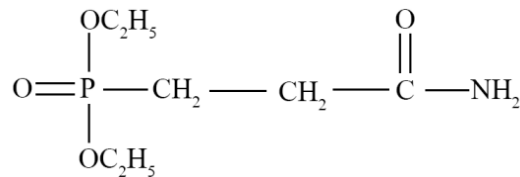
(d)



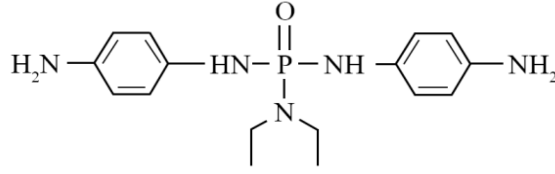
(e)

Şekil 21. Fosforlu polialkilen aminin kimyasal yapısı.

Kamalipour ve ark. (2021) tarafından, dietil fosfitin akrilamid ile reaksiyonundan hazırlanan tek ajanlı bir aminin kullanılması önerilmiştir (Şekil 22). Bu malzeme epoksi reçinelerde çok etkilidir ve elektronik ekipmanların paketlenmesinde kullanılır. Alev geciktiricili sertleştirici madde, p-fenilendiamin diamid dietilfosfonattan (DEPPPD) sentezlenmiştir (Şekil 23). Sonuçlara göre, bu ajan epoksi reçine ile iyi uyumluluk ve mükemmel alev geciktirici özellikler göstermiştir. Bu kürlenme ajanının 45 phr eklenmesiyle LOI değeri %31.10, darbe mukavemeti 6.50 m<sup>2</sup>/kJ, çekme mukavemeti 48.21 MPa ve yapışma mukavemeti 141.61 MPa ulaşmıştır. Alev geciktirici miktarı arttıkça kül miktarı artmış ve alev geciktirici özellikleri iyileşmiştir.



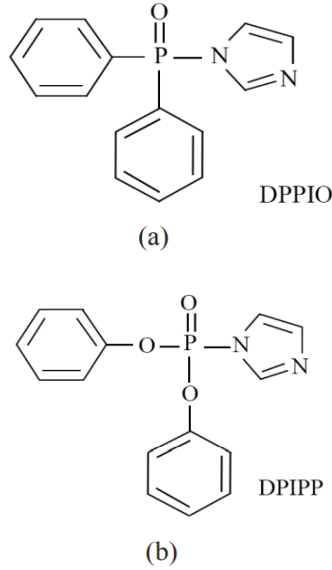
Şekil 22. Fosfor içeren tek ajanlı amidinin kimyasal yapısı (Kamalipour ve ark., 2021).



Şekil 23. DEPPPD alev geciktirici kürlenme maddesinin kimyasal yapısı (Liu & Liang, 2017).

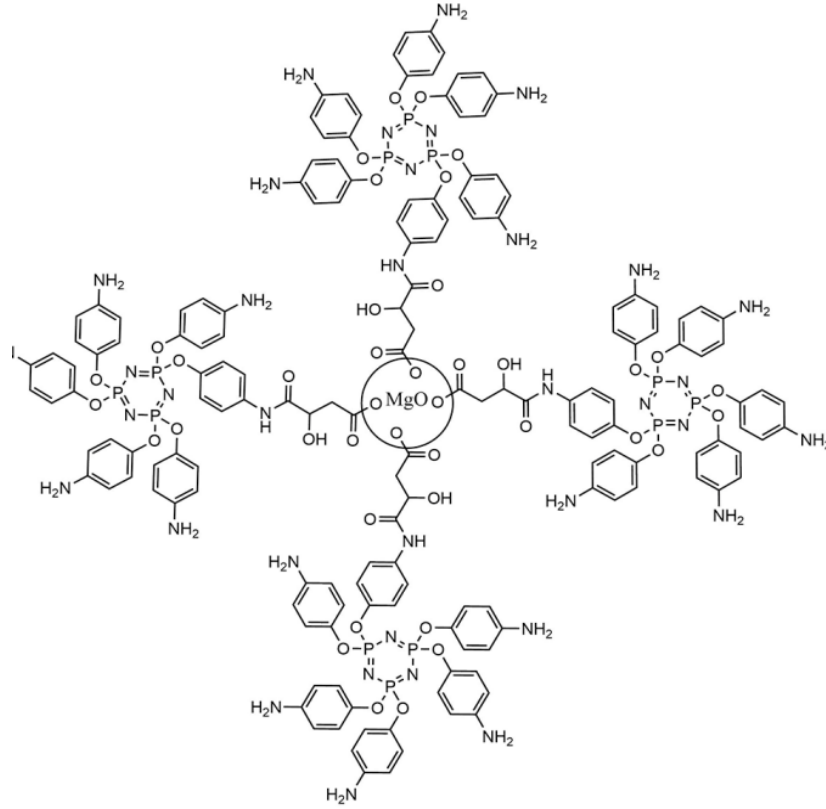
İmidazoller, tip III aminler gibi, epoksi reçinelerini anyonik polimerizasyon yoluyla iyileştiren sertleştirici maddelerdir. Bu kürlenme ajanları nispeten uzun bir hizmet ömrüne sahiptir ve epoksi reçineleri 80 °C ila 120 °C arasında hızla kürlür. Bu imidazollerin aktivitesini azaltmak ve tek bileşenli bir epoksi reçine sistemi oluşturmak için kürlenme maddeleri genellikle diğer malzemelerle kombinasyon halinde kullanılır (Xu ve ark., 2014).

Xu ve ark. (2018), 1-(difenilfosfinil)-1H-imidazol oksit (DPPIO) ve difenil 1H-imidazol-1-ilfosfonat (DPIPP) olarak adlandırılan iki tür imidazol türevini sentezleyerek gizli bir kürlenme maddesi olarak epoksi reçinesinde kullanmışlardır. Bu faktörlerin gecikme özellikleri dinamik bir reometre ile doğrulanmıştır. DPPIO ve DPIPP numuneleri ortam sıcaklığında stabil kalırken, 150 °C'ye kadar artan sıcaklıkla kürlenmişlerdir. DPPIO içeren numune 5-6 dakikada jelleşerek hızla tam kürlenmeye ulaşmıştır. TGA testinin sonuçları, her iki kürlenme maddesinin de referans numunedeki (metil imidazol epoksi reçinesi) daha fazla kalıntı küle ve daha az bozunmaya sahip olduğunu göstermiştir. Ağırlıkça %15 DPPIO ve DPIPP eklenmesiyle, LOI değerleri referans numunedeki %21'den sırasıyla %38 ve %31.5'e yükselmiş ve UL-94'de V-0 derecesini almıştır. Şekil 24, gizli sertleştirme maddelerinin (DPPIO ve DPIPP) kimyasal yapısını göstermektedir.



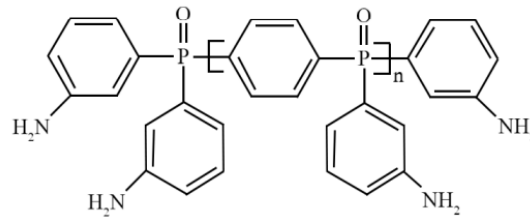
Şekil 24. Gizli sertleştirme maddelerinin (DPPIO ve DPIPP) kimyasal yapısı.

Guo ve ark. (2018) tarafından, alev geciktirici sertleştirme ajanını, magnezyum oksit nanoparçacıklarına bağlanmıştır. Bağlayıcı maddenin eklendiği yaklaşık 1,4 nm partikül boyutuna sahip bu nanopartiküllerin epoksi reçinesi için etkili bir kürlenme maddesi olduğu gösterilmiştir. Şekil 25, bu sertleştirme maddesinin yapısını göstermektedir.



Şekil 25. Magnezyum oksit nanopartiküller üzerine bağlı alev geciktiricinin sertleştirici maddesinin kimyasal yapısı (Guo ve ark., 2018).

*m*-aminofenol fenil fosfin oligomerini (APPPOO) sentezleyerek, bu kürlenme maddesinin mekanik özellikler ve nem emilimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu kürlenme maddesi ile epoksi reçinenin LOI değeri %34.8'e ulaşırken, 1.6 ve 3 mm kalınlığında olan numuneler UL-94 testinde V-1 ve V-2 derecesini almıştır. TGA testi, artan fosfor miktarı ile bozunmanın başlangıç sıcaklığının düştüğünü ancak yüksek sıcaklıklarda kalan külün arttığını göstermiştir. Bu kürlenme maddesinin eklenmesiyle, polimer substrata ısı ve oksijen transferini engelleyebilen kompakt ve homojen bir kül tabakası oluşturulmuştur. *m*-aminofenil fenilfosfin oksit oligomeri ile kürlenmiş epoksi reçineleri, mükemmel su emme direncine sahiptir, ancak bu maddenin epoksi reçinesine eklenmesi, mekanik özelliklerini azaltmıştır. Şekil 26, APPPOO alev geciktirici sertleştirme maddesinin kimyasal yapısını göstermektedir.

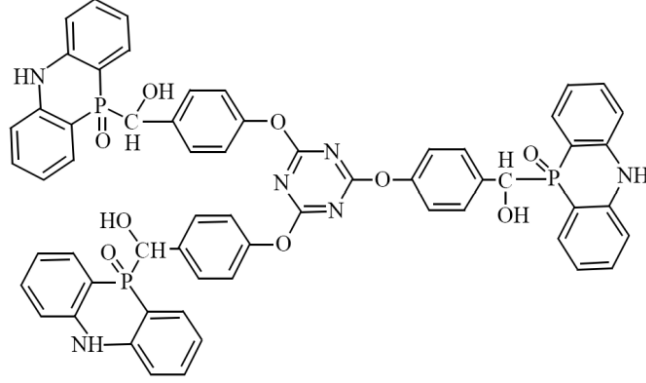


Şekil 26. *m*-aminofenil fenilfosfin oligomer oksitinin kimyasal yapısı (Guo ve ark., 2018).

Wu ve ark. (2018), 5,10-dihidrogenofosfato-10-oksit (DPPA) yapısına triazin ekleyerek alev geciktirici bir sertleştirme maddesi, 5,10-dihidrogenofosfasin-10-oksit (TRIDPPA)-triazine, sentezlemişlerdir. Bu madde epoksi reçine için kürlenme maddesi 4,4-diaminodifenil metan (DDM) ile birlikte yardımcı bir sertleştirme maddesi olarak kullanılmıştır. Fosfor miktarı ağırlıkça sadece %0.086 olan, ağırlıkça %1 TRIDPPA içeren epoksi reçine UL-94 testinde V-0 derecesini almış ve LOI değeri %30.7 olmuştur. Saf epoksi reçinesi ile karşılaştırıldığında, epoksi reçinesinin camsı geçiş sıcaklığı TRIDPPA'nın ağırlığına göre %1 artarak 5 °C'ye yükselmiştir. TRIDPPA epoksi reçinesinin mekanik

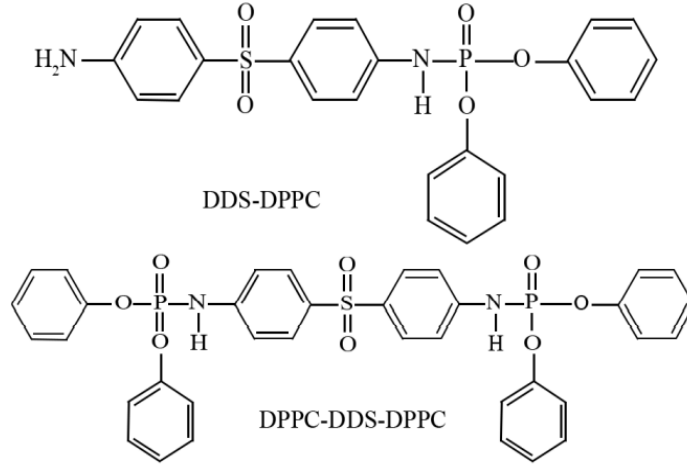


özellikleri de araştırılmıştır. Sonuçlar, sinterlenmiş epoksi reçine ağında bir triazin halkasının varlığının, saf epoksi reçinesine kıyasla mekanik özellikleri arttırdığını göstermiştir (Şekil 27).



Şekil 27. 5,10-dihidro-nofezfazin-10-oksit ile işlevselleştirilmiş triazinin kimyasal yapısı (Wu ve ark., 2018).

Başka bir çalışmada, 4,4-diaminodinil fenil sülfonun (DDS) bir ve iki yüzüne difenilfosforil klorür eklenerek iki alev geciktirici kürleme ajanı (DDS-DPPC ve DPPC-DDS-DPCC) araştırılmış ve bunların alev geciktirici özellikleri ile latent özellikleri incelenmiştir. Sonuçlara göre, DPPC-DDS ve DPPC-DDS-DPPC içeren karışımlar, Disiyandiamid/Epoksi numunesine göre daha iyi termal stabilite ve daha fazla kül miktarı göstermiştir. Ayrıca, DPPC-DDS-DPPC'li numunede 120 gün sonra bile viskozitede bir artış gözlenmezken DPPC-DDS epoksi reçinesinin viskozitesi 90 gün sonra artmıştır. Alev geciktirici kürleme maddesi DPPC-DDS-DPPC içeren epoksi reçine UL-94 testinde V-0, DPPC-DDS alaşımı V-1 değerini elde etmiştir. Şekil 28, DPPC-DDS ve DPPC-DDS-DPPC gizli sertleştirme maddelerinin kimyasal yapısını göstermektedir (Wu ve ark., 2018).



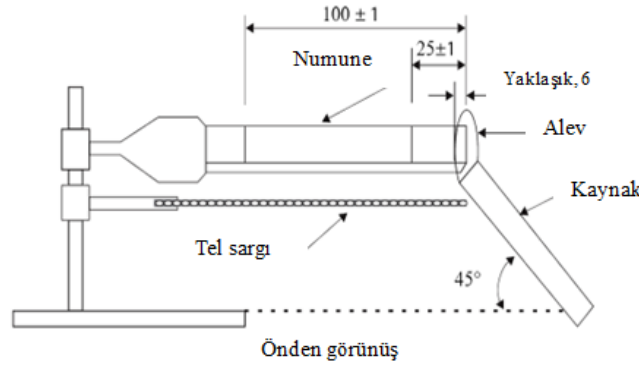
Şekil 28. DPPC-DDS ve DPPC-DDS-DPPC gizli sertleştirme maddelerinin kimyasal yapısı (Kamalipour ve ark, 2020).

## 6. Alev Geciktirici Özellikleri Ölçmek için Kullanılan Testler

Polimerik malzemelerin tutuşması, kütle aktarımı, enerji ve ısı aktarımı, akışkanlar dinamiği ve ayrışma sürecini içeren karmaşık bir süreçtir. Polimerik malzemelerin yanıcılığı, alevin yayılma hızı ve açığa çıkan ısı miktarı ile belirlenebilir. Alev geciktirici özellikler temel olarak UL-94, LOI ve koni kalorimetri ölçümleriyle test edilirler.

## 6.1. UL-94 testi

UL-94 test sonuçları, endüstride polimerlerin yanıcılığının bir ölçüsü olarak kabul görmüştür. Bu sonuçlar, farklı polimer ürünlerini karşılaştırmak ve nitelendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu testte, yanma hızını hesaplamak için numunenin yanma süresi belirli aralıklarla ölçülür. Numunenin yanma süresi ne kadar uzun olursa veya hesaplanan yanma hızı ne kadar kısa olursa, söz konusu numunenin yanıcılığı o kadar düşük olur (Marti ve ark., 2018). Bu test numunenin nasıl tutulduğuna bağlı olarak yatay ve dikey olmak üzere iki farklı tipte yapılır. Her test belirli bir standardı takip eder. Yatay yanma testinde (H 94-UL), 125 mm uzunluk ve 13 mm genişliğindeki bir numunede 100 mm mesafede ve numuneden 75 mm uzunluğunda 30 s alev uygulandıktan sonra yanma hızı değerlendirilir. 75 mm mesafede numune yanma süresi ve yanma hızının ölçülmesi dak/mm olarak bildirilir. Gözle görünür bir alev olmadığında, 25 ile 100 mm işaretli mesafeler arasında alevin sönmesi veya 40 dk/mm yanma hızı ile 100 mm işaretli mesafeye ulaşmaya kadar numuneler yatay yanma (HB) kategorisinde yer alırlar. Şekil 29, UL-94 testinde yatay yanma testinin (ASTM (American Society for Testing and Materials: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu) D635) nasıl gerçekleştirildiğini gösterir (Kiliaris & Papaspyrides, 2010; Jawaid ve ark., 2018; Kim ve ark., 2021).



Şekil 29. ASTM D635'te yatay yanma testi.

Dikey yanma testi (UL-94 V), dikey olarak tutuşma eğilimini belirlemek için yapılan bir laboratuvar testidir. Test, alevin uygulanmasından sonra malzemenin reaksiyonunu doğrudan değerlendirebilir. ASTM D3801 standardına göre (UL-94 standardına eşdeğer), 125 x 13 x 125 mm<sup>3</sup> boyutlarında beş numune gereklidir. Numune 10 saniye süreyle iki kez aleve maruz bırakılır, numunenin yanma ve damlama süresi kaydedilir (Şekil 30). Alev uygulandıktan sonra ilk 10 s (alev süresinden sonra,  $t_1$ ) ve sonra parlama zamanı ( $t_2$ ), ikinci 10 s uygulandıktan sonra ve alev uygulaması durdurulduktan sonra yanan parçanın kızarması (kızdırma zamanı,  $t_3$ ) not alınır (Kamalipour ve ark., 2021). Standartta göre, test sonuçları Çizelge 1'de olduğu gibi V-0, V-1, V-2 veya NR olarak farklı derecelerde sınıflandırılabilir.

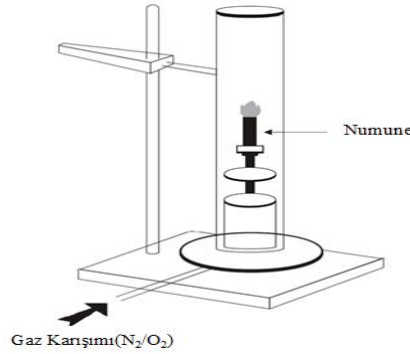
Çizelge 1. Yanma testinin malzeme sınıflandırması (Jawaid ve ark., 2018)

Test Kriterleri	V-0	V-1	V-2
Her numune için parlama süresi $t_1$ ve $t_2$	$\leq 10$ s	$\leq 30$ s	$\leq 30$ s
Genel parlama süresi ( beş numune için $t_1$ ve $t_2$ )	$\leq 50$ s	$\leq 250$ s	$\leq 250$ s
İkinci alev uygulamasından sonra her numune için parlama süresi ve yanma sonrası süre ( $t_2+t_3$ )	$\leq 30$ s	$\leq 60$ s	$\leq 60$ s
Tutma çubuğuna kadar her numunenin parlaması ve yanma sonrası süresi	Hayır	Hayır	Hayır
Alevli parçacıklar veya damlacıklar nedeniyle pamuklu işaretleyicilerin tutuşması	Hayır	Hayır	Evet

## 6.2. Sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI)

Bu test, malzemenin nispi yanıcılığını belirlemek için ASTM D2863, ISO (International Organization for Standardization: Uluslararası Standardizasyon Örgütü) 4589-2 ve NES714 standartlarıyla kullanılır. Sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI), normal sıcaklıklarda ve özel koşullarda numunenin tutuşmasına neden olan ve tutuşmasının 3 dakika devam ettiği oksijen ve nitrojen kombinasyonundaki en düşük oksijen konsantrasyonudur. Oksijen indeksi yüksek olan numune, en düşük yanıcılık özelliğine sahiptir. Bu testte numune dikey olarak cihazın cam kolonunun ortasına yerleştirilir (Şekil 31). Oksijen konsantrasyonu numunenin uygulama koşullarına göre seçilir. Bu test, oksijen konsantrasyonu numunelerin tutuşması için gereken minimum seviyeye ve 3 dakika boyunca stabilitesine ulaşana kadar devam ettirilir. Kolayca yanıcı olan numunelerin LOI değeri %21'den azdır (havadaki oksijen yüzdesi). Aleve dayanıklı numunelerde ise bu değer %21'den fazladır (LOI değeri ne kadar yüksek olursa, alev geciktirici özelliği o kadar iyi olur) (Kamalipour ve ark., 2021; ISO, 1996). Sınırlayıcı oksijen indeksi ayrıca Krevelen Van denkleminde (Denklem 1) teorik olarak hesaplanabilir (Anioł, B., & Jankowski, 2018; Trigo-López ve ark., 2020). Bu denklemde CR, nötr gaz atmosferinde termoset bozunma testinin sonunda kalan kül miktarıdır.

$$LOI = 17,5 + 0,4CR \quad (1)$$



Şekil 31. LOI cihazının şematik gösterimi (Dewaghe ve ark., 2011).

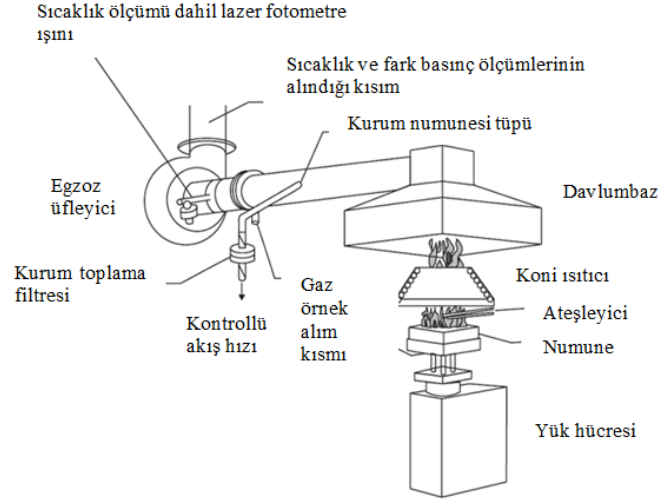
## 6.3 Koni kalorimetrisi

Koni kalorimetre, yangın güvenliği mühendisliğinde birçok araştırmada kullanılan en önemli cihazlardan biridir ve yanan malzemelerin performansının incelenmesinde birçok uygulaması vardır. Bu cihaz aşağıdaki parçalardan oluşur:

- Elektrikli koni şeklindeki ısıtıcı;
- Numune tutucu;
- Oksijene duyarlı gaz çıkış sistemi;
- Akış ölçüm cihazı;
- Ateşleme bölümü;
- Sonuçların gözden geçirilmesi ve kaydedilmesi için sistem ve
- Örnek kütle azaltma bölümü.

Koni kalorimetrenin şematik gösterimi Şekil 32'de yer almaktadır. Bu testte numune, alüminyum folyo ve yün ile kaplanır ve numuneyi tutuşturmak için konik bir ısıtıcı kullanılır. Cihazın bu parçasının olmaması durumunda numuneden çıkan dumanın sıcaklığını, basıncını ve miktarını ölçmek çok zorlaşır. Havalandırma, konik bir termometrenin önemli bir parçasıdır ve cihazın, sistem sıcaklığını soğutmak/ düzenlemek için küçük bir su kaynağına ihtiyacı vardır. Bu test kullanılarak, yanıcılık, zehirli gazların miktarı ve açığa çıkan duman ölçülür. Ayrıca konik kalorimetrelerin geliştirilmesiyle birlikte, bir dizi kimyasal ve fiziksel yanma parametresi değerlendirilebilir. Koni kalorimetresi şu anda alev geciktiricilik alanında laboratuvar ölçeğinde en önemli test cihazıdır. Konik kalorimetrenin parçaları Şekil 33'te gösterilmiştir.

Koni kalorimetre, yoğun bir fazda küçük yanıcı malzeme örneklerinin davranışını inceleyen bir cihazdır. Bu test, yanıcı malzemeleri, bilgisayar modellemesini, tasarım hedeflerini, geliştirmeyi ve yangın tahminini değerlendirmek için kullanılır. Araştırmacılar, yangının yayılmasını tahmin etmek için konik kalorimetrik testin sonuçlarını doğrudan veya bu sonuçları matematiksel denklemlerde ve modellerde kullanabilir (Dewaghe ve ark., 2011).



Şekil 32. Koni kalorimetre cihazının şematik gösterimi (Dewaghe ve ark., 2011).

Bu testte, salınan maksimum ve ortalama ısı miktarı, salınan toplam ısı, etkin yanma ısı, spesifik söndürme bölgesi, çıkış debisi, kütle dağılıma hızı, numune nihai kütlesi, kararlı yanma süresi, oksijen konsantrasyonu, karbon monoksit, karbon gibi zamana karşı ölçülebilen parametreler kullanılır. Yayılan maksimum ısı miktarı ve buna ulaşma hızı yangının yayılma hızını ölçen parametrelerdir (Javid & Thariq, 2018).



Şekil 33. Koni kalorimetre cihazı (Jawaid ve ark., 2018).

Bu test ISO 5660, ASTM E1354, E1474, E1740, F1550, D6113, 135 ULC ve 476 BS standartlarına göre yapılmaktadır. Konik kalorimetre testinde genel kural, numunedeki yanıcı gazlardaki oksijen konsantrasyonundaki azalma miktarını ölçmektir. Genellikle numunenin yüzey boyutu  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  ve kalınlığı  $50 \text{ mm}$  ( $\pm 3 \text{ mm}$  kalınlıklar da tercih edilir) olup  $0-100 \text{ kW/m}^2$  ısı

radasyonuna maruz kalır. Verilen ısı örneğinden çıkan uçucu gazlar, bir elektrik kıvılcımı altında ateşlenir ve daha fazla araştırma için incelenir. Sonuçlar analiz edilerek, açığa çıkan ısının oranı ve numunedeki zehirli gazların miktarı elde edilir. Ek olarak lazer ışını tarafından dumanın zayıflama miktarı ölçülerek üretilen duman miktarı tahmin edilebilir. Ayrıca numune ağırlık sensörüne yerleştirilerek yanma sırasında numunenin kütle kaybı miktarı da belirlenir. Detaylı inceleme için numune farklı ısı akışlarında değerlendirilmelidir (25, 35, 50 ve 75 kW/m<sup>2</sup>). Numunenin yüzeyi düz olmalı ve test numunesi ürünü nihai ürüne mümkün olduğunca yakın temsil etmelidir (Babrauskas, 1984; ASTM, 1999; Hirschler, 2001; Xu ve ark., 2015; Babrauskas, 2016; ISO, 2022).

## 7. Sonuç

Halojen alev geciktiriciler, alev geciktiricilikte çok önemli bir rol oynar. Ancak çevresel kaygılar ve yanma sırasında zehirli gazların salınması gibi nedenlerle, bu inhibitörleri halojen içermeyen alev geciktiricilerle değiştirmeye artan bir ilgi vardır. Bu bağlamda, halojensiz alev geciktiricilerin performansının düşük olması, daha yüksek maliyet, damlama ve azaltılmış mekanik özellikler gibi zorlukları vardır. Alev geciktiriciler alanındaki bilgi ve teknolojinin gelişmesi, çok sayıda halojenli alev geciktiricinin kullanımında kısıtlamaların olması bunlar için alternatif değerlendirmelere yol açmıştır. Araştırmalar, bu alev geciktiricilere iyi alternatifler olduğunu göstermiştir. Halojensiz alev geciktiriciler, halojenli alev geciktiricilerle aynı alev geciktirici verimliliğe ve teknik uygulamalara sahiptir.

Halojenli alev geciktiricilerin yerini alacak organik fosfor bileşikleri, mineral alev geciktiriciler, nitrojen ve silikon bazlı alev geciktiriciler, şişebilen alev geciktiriciler ve nanokompozitler gibi çeşitli alev geciktirici bileşikler bulunmaktadır. Ticari olarak fosforlu alev geciktiriciler, halojen alev geciktiricilere kıyasla iyi performansları, çevre sorunları ve insan sağlığı ile ilgili sorunlar nedeniyle geliştirilmektedir. Halojen alev geciktiricilerin kullanıldığı birçok uygulamada reaktif alev geciktiriciler ve fosfor katkı maddeleri ikame olarak kullanılmaktadır. Fosfor gibi diğer halojensiz alev geciktiriciler, yoğun fazda kül oluşumu gibi önemli ve verimli işlemlere sahip olabilir.

Araştırmalar alev geciktiricilerde gaz fazı performansının çok önemli olabileceğini göstermiştir. Fosforlu alev geciktiricilerde PO radikali gaz fazında çok önemli bir rol oynar. Reaktif epoksi içeren fosfor monomerlerinin sentezi için DOP ve türevlerinin kullanımı üzerine pek çok araştırma yapılmıştır. DOP'nin aromatik bileşiklerle (kinon gibi) entegrasyonu, düşük fosfor seviyelerinin V-0 ve yüksek LOI değerlerine ulaşması ihtiyacı nedeniyle epoksi reçine zincirlerini uzatmak için veya epoksi reçine kütleme sisteminin bir parçası olarak da kullanılabilir. Bisglisinat aril veya alkil fosfonatlar, epoksi reçineli monomerler olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Fenilfosfonatın yapısı, yüksek verimi ve termal kararlılığı nedeniyle epoksi reçinelerin yapısında yaygın olarak kullanılmaktadır. Amin ikameli trifenilfosfin oksitler veya difenil alkil fosfin oksitler, yüksek termal kararlılıkları nedeniyle epoksi reçineleri için potansiyel kütleme maddeleri olarak özel ilgi çekmiştir. Genel olarak, halojensiz sistemler daha az duman dolayısıyla daha az toksik bileşik üretir. Alev geciktirici üreticileri, yeni ve daha iyi ürünler üretmek için çalışmalarına devam etmektedirler.

## 8. Kısaltmalar

APP	Ammonium polyphosphate - <i>Amonyum polifosfat</i>
APPOO	<i>m</i> -Aminophenylene phenyl phosphine oxide oligomer - <i>m</i> - <i>Aminofilen fenil fosfin oksit oligomeri</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials - <i>Amerikan Test ve Malzeme Kurumu</i>
ATH	Aluminium trihydroxide - <i>Alüminyum trihidroksit</i>
BADP	Bisphenol A diphenyl phosphate - <i>Bisfenol A difenil fosfat</i>
BAMPO	Bis ( 3-aminophenyl ) methyl phosphine oxide - <i>Bis(3-aminofenil) metilfosfin oksit</i>
DDM	4,4- Diaminodiphenyl methane - <i>4,4- Diaminodifenil metan</i>
DDS	4,4-Diaminodiphenyl sulfone - <i>4,4-Diaminodifenil sülfon</i>
DEPPPD	Diethyl phosphonic <i>p</i> -phenylenediamine diamide - <i>Dietyl fosfonik p-fenilendiamin diamid</i>



DGEBA	Diglycidyl ether of bisphenol A - <i>Bisfenol A'nın diglisidil eteri</i>
DGEBC	Diglycidylether of 1,1- dichloro-2,2-bis(4-hydroxyl phenyl) ethylene - <i>1,1-dikloro-2,2-bis(4-hidroksil fenil)etilenin diglisidileteri</i>
Dicy	Dicyandiamide - <i>Disiyandiamid</i>
DMMP	Dimethyl methyl phosphonate - <i>Dimetil metil fosfonat</i>
DOPO	9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphahenanthrene-10-oxide - <i>9,10-Dihidro-9-oksa-10-fosfahenantren-10-oksit</i>
DPIPP	Diphenyl 1H imidazole-1-ylphosphonate - <i>Difenil 1H imidazol-1-ilfosfonat</i>
DPPA	5,10-Dihydro-phenophosphazine-10-oxide - <i>5,10-Dihidro-fenofosfazın-10-oksit</i>
DPPC	Diphenyl phosphoryl chloride - <i>difenil fosforil klorür</i>
DPPIO	1-(Diphenylphosphinyl)-1H-imidazole oxide - <i>1-(Difenilfosfinil)-1H-imidazol oksit</i>
EADP	2-({9-[4,6-Diamino-1,3,5-triazin-2-yl] amino}-3,9-dioxide-2,4,8,10-tetraoxa-3,9-diphosphaspiro[5,5]undecan-3-yl)oxy) ethyl methacrylate - <i>2-({9-[4,6-Diamino-1,3,5-triazin-2-il] amino}-3,9-dioksit-2,4,8,10-tetraoksa-3,9-difosfaspiro[5,5]undekan-3-il)oksi)etil metakrilat</i>
EVA	Ethylene vinyl acetate - <i>Etilen vinil asetat</i>
HDT	Heat deflection temperature - <i>Isı sapma sıcaklığı</i>
HUMCS	Chitosan/Urea compound based phosphonic acid melamine salt - <i>Kitosan/Üre bileşiği bazlı fosfonik asit melamin tuzu</i>
ISO	International Organization for Standardization - <i>Uluslararası Standardizasyon Örgütü</i>
LOI	Limiting oxygen index - <i>Sınırlayıcı oksijen indeksi</i>
MDH	Magnesium hydroxide - <i>Magnezyum hidroksit</i>
ODDP	Octahydro-2,7-di(N,N-dimethylamino-1,6,3,8,2,7- dioxadiazadiphosphocine - <i>Oktahidro-2,7-di(N,N-dimetilamino-1,6,3,8,2,7-dioksadiazadifosfesin</i>
P/ABS	Polycarbonate/ acrylonitrile butadiene styrene - <i>Polikarbonat/akrilonitril bütadien stiren</i>
P-Ph	DOPO-containing 4-[(phenylamino)methyl] phenol - <i>DOPO içeren 4-[(fenilamino)metil] fenol</i>
P-DDS-Ph	DOPO-containing Mannich- type bases - <i>DOPO içeren Mannich tipi bazlar</i>
PER	Pentaerythritol - <i>Pentaeritritol</i>
POSS	Polyhedral oligomeric silsesquioxanes - <i>Çokyüzlü oligomerik silseskioksanlar</i>
PPO/ HIPS	Polyphenylene oxide/ high impact polystyrene - <i>Polifenilen oksit/yüksek darbeli polistiren</i>
PSiN	[(1,1,3,3-tetramethyl-1,3-disilazanediy)di-1,2-ethanediyl] bis (diphenylphosphine oxide) - <i>[(1,1,3,3-tetrametil-1,3-disilazandiil)di-1,2-etandiil] bis (difenilfosfin oksit)</i>
RDP	Resorcinol bis ( diphenyl phosphate ) - <i>Resorsinol bis ( difenil fosfat )</i>
RPUF	Rigid polyurethane foam - <i>Sert poliüretan köpük</i>
TBBA	Tetrabromobisphenol A - <i>Tetrabromobisfenol A</i>
TCP	Tricresyl phosphate - <i>Trikresil fosfat</i>
TGA	Thermogravimetric analysis - <i>Termogravimetrik analiz</i>
TPP	Triphenyl phosphate - <i>Trifenil fosfat</i>
TRIDPPA	5,10-Dihydro-phenophosphazine-10-oxide functioned triazine - <i>5,10-Dihidro-fenohfosfazın-10-oksit fonksiyonlu triazin</i>
TSPB	Toluidine spirocyclic pentaerythritol bisphosphonate - <i>Toluidin spirosiklik pentaeritritol bifosfonat</i>

## Kaynakça

- Akindoyo, J. O., Beg, M., Ghazali, S., Islam, M. R., Jeyaratnam, N., & Yuvaraj, A. R. (2016). Polyurethane types, synthesis and applications—a review. *Research Advances*, 6(115), 114453-114482. doi:10.1039/C6RA14525F
- Anioł, B., & Jankowski, D. (2018). Flame retardants of polymeric materials—calculation of the oxygen index. *Thechnical Transaction*, 9, 57-66. doi:10.4467/2353737XCT.18.131.8970
- ASTM. (1999). *Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter* (E1354-99).

- ASTM. (2010) *Standard test method for measuring the comparative burning characteristics of solid plastics in a vertical position* (D3801).
- Babrauskas, V. (1984). Development of the cone calorimeter—a bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption. *Fire and Materials*, 8(2), 81-95. doi:10.1002/fam.810080206
- Babrauskas, V. (2016). The cone calorimeter. In *SFPE handbook of fire protection engineering* (pp. 952-980). New York, USA: Springer. doi:10.1007/978-1-4939-2565-0\_26
- Baby, A., Tretsiakova-McNally, S., Arun, M., Joseph, P., & Zhang, J. (2020). Reactive and additive modifications of styrenic polymers with phosphorus-containing compounds and their effects on fire retardance. *Molecules*, 25(17), 3779. doi:10.3390/molecules25173779
- Bahreyni, E., Farid, M., Fakhari, M. A., & Farid, M. (2017). Synergistic Effect of Intumescent Flame Retardant and Organically Modified Montmorillonite on Flame-Retardant and Foaming Properties of High Density Polyethylene/Walnut Shell Powder Biocomposites. *Iranian Journal of Polymer Science & Technology (Persian)*, 30(4), 299-310. doi:10.22063/jipst.2017.1504
- Betts, K. S. (2008). New thinking on flame retardants. (2008). *Environews*, 116, 5. doi.org/10.1289/ehp.116-a210
- Bourbigot, S., & Duquesne, S. (2007). Fire retardant polymers: recent developments and opportunities. *Journal of Materials Chemistry*, 17(22), 2283-2300. doi:10.1039/B702511D
- Chattopadhyay, D. K., & Webster, D. C. (2009). Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes. *Progress in Polymer Science*, 34(10), 1068-1133. doi:10.1016/j.progpolymsci.2009.06.002
- Chiu, Y. S., Jiang, M. D., & Liu, Y. L. (2002). *U.S. Patent No. 6,441,067*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Cho, C. S., Fu, S. C., Chen, L. W., & Wu, T. R. (1998). Aryl phosphinate anhydride curing for flame retardant epoxy networks. *Polymer International*, 47(2), 203-209. doi:10.1002/(SICI)1097-0126(1998100)47:2%3C203::AID-PI55%3E3.0.CO;2-X
- Dasari, A., Yu, Z. Z., Cai, G. P., & Mai, Y. W. (2013). Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*, 38(9), 1357-1387. doi:10.1016/j.progpolymsci.2013.06.006
- Derouet, D., Morvan, F., & Brosse, J. C. (1996). Chemical modification of epoxy resins by dialkyl (or aryl) phosphates: evaluation of fire behaviour and thermal stability. *Journal of Applied Polymer Science*, 62(11), 1855-1868. doi:10.1002/(SICI)1097-4628(19961212)62:11%3C1855::AID-APP10%3E3.0.CO;2-Y
- Dewaghe, C., Lew, C. Y., Claes, M., Belgium, S. A., & Dubois, P. (2011). Fire-retardant applications of polymer-carbon nanotubes composites: Improved barrier effect and synergism. In T. McNally & P. Pötschke (Eds.), *Polymer-Carbon Nanotube Composites* (pp. 718-745). Philadelphia, USA: Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9780857091390.3.718
- Dorieh, A., Pour, M. F., Movahed, S. G., Pizzi, A., Selakjani, P. P., Kiamahalleh, M. V., ... & Aghaei, R. (2022). A review of recent progress in melamine-formaldehyde resin based nanocomposites as coating materials. *Progress in Organic Coatings*, 165, 106768. doi:10.1016/j.porgcoat.2022.106768
- Gao, T. T., Li, Z. W., Yu, L. G., & Zhang, Z. J. (2015). Preparation of zinc hydroxystannate nanocomposites coated by organophosphorus and investigation of their effect on mechanical properties and flame retardancy of poly (vinyl chloride). *Research Advances*, 5(120), 99291-99298. doi.org/10.1039/C5RA10086K
- Gilman, J. W. (1999). Flammability and thermal stability studies of polymer layered-silicate (clay) nanocomposites. *Applied Clay Science*, 15(1-2), 31-49. doi:10.1016/S0169-1317(99)00019-8
- Green, J. (1996). Mechanisms for flame retardancy and smoke suppression—a review. *Journal of Fire Sciences*, 14(6), 426-442. doi:10.1177/073490419601400602
- Gu, L., Ge, Z., Huang, M., & Luo, Y. (2015). Halogen-free flame-retardant waterborne polyurethane with a novel cyclic structure of phosphorus-nitrogen synergistic flame retardant. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(3), 41288. doi:10.1002/app.41288

- Gu, L., Qiu, C., Qiu, J., Yao, Y., Sakai, E., & Yang, L. (2020). Preparation and characterization of DOPO-functionalized MWCNT and its high flame-retardant performance in epoxy nanocomposites. *Polymers*, 12(3), 613. doi:10.3390/polym12030613
- Guo, X., Wang, H., Ma, D., He, J., & Lei, Z. (2018). Synthesis of a novel, multifunctional inorganic curing agent and its effect on the flame-retardant and mechanical properties of intrinsically flame retardant epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(29), 46410. doi:10.1002/app.46410
- Hergenrother, P. M., Thompson, C. M., Smith Jr, J. G., Connell, J. W., Hinkley, J. A., Lyon, R. E., & Moulton, R. (2005). Flame retardant aircraft epoxy resins containing phosphorus. *Polymer*, 46(14), 5012-5024. doi:10.1016/j.polymer.2005.04.025
- Hirschler, M. M. (2001, June). *Fire safety in detention environments*. Fire Risk & Hazard Assessment Symposium, Fire Protection Research Foundation.
- Hollingbery, L. A., & Hull, T. R. (2010). The fire retardant behaviour of huntite and hydromagnesite—A review. *Polymer Degradation and Stability*, 95(12), 2213-2225. doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2010.08.019
- Horrocks, A. R., & Price, D. (Eds.). (2008). *Advances in Fire Retardant Materials*. Philadelphia, USA: Woodhead Publishing.
- Hull, T. R., Witkowski, A., & Hollingbery, L. (2011). Fire retardant action of mineral fillers. *Polymer Degradation and Stability*, 96(8), 1462-1469. doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2011.05.006
- ISO. (1996). *Plastics—Determination of burning behaviour by oxygen index—Part 2: Ambient-temperature test (4589)*.
- ISO. (2002). *Reaction-to-fire tests—Heat release, smoke production and mass loss rate—Part 1: heat release rate (cone calorimeter method) (5660-1)*.
- Jawaid, M., Thariq, M., & Saba, N. (Eds.). (2018). *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Philadelphia, USA: Woodhead Publishing.
- Jeng, R. J., Wang, J. R., Lin, J. J., Liu, Y. L., Chiu, Y. S., & Su, W. C. (2001). Flame retardant epoxy polymers using phosphorus-containing polyalkylene amines as curing agents. *Journal of Applied Polymer Science*, 82(14), 3526-3538. doi:10.1002/app.2215
- Kamalipour, J., Beheshty, M. H., & Zohurianmehr, M. J. (2020, November). *Synthesis and preliminary of new phosphorous-containing flame-retardant hardeners for epoxy resin*. 14th International Seminar on Polymer Science and Technology, Tahrán, Iran.
- Kamalipour, J., Beheshty, M. H., & Zohuriaan-Mehr, M. J. (2021). Flame retardant compounds for epoxy resins: A review. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 34(1), 3-27. doi:10.22063/jipst.2021.1790
- Kiliaris, P., & Papispyrides, C. D. (2010). Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: an overview of flame retardancy. *Progress in Polymer Science*, 35(7), 902-958. doi:10.1016/j.progpolymsci.2010.03.001
- Kim, Y., Lee, S., & Yoon, H. (2021). Fire-safe polymer composites: Flame-retardant effect of nanofillers. *Polymers*, 13(4), 540. doi:10.3390/polym13040540
- Kozłowski, R., & Władyska-Przybylak, M. (2008). Flammability and fire resistance of composites reinforced by natural fibers. *Polymers for Advanced Technologies*, 19(6), 446-453. doi:10.1002/pat.1135
- Kuo, P. L., Wang, J. S., Chen, P. C., & Chen, L. W. (2001). Flame-retarding materials, 3. Tailor-made thermal stability epoxy curing agents containing difunctional phosphoric amide groups. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 202(11), 2175-2180. doi:10.1002/1521-3935(20010701)202:11%3C2175::AID-MACP2175%3E3.0.CO;2-U
- La Rosa, A. D., Recca, A., Carter, J. T., & McGrail, P. T. (1999). An oxygen index evaluation of flammability on modified epoxy/polyester systems. *Polymer*, 40(14), 4093-4098. doi:10.1016/S0032-3861(98)00646-6
- Levchik, S. V., Camino, G., Luda, M. P., Costa, L., Costes, B., Henry, Y., ... & Morel, E. (1995). Mechanistic study of thermal behaviour and combustion performance of epoxy resins. II. TGDDM/DDS system. *Polymer Degradation and Stability*, 48(3), 359-370. doi:10.1016/0141-3910(95)00084-Y

- Levchik, S. V., & Weil, E. D. (2004). Thermal decomposition, combustion and fire-retardancy of polyurethanes—a review of the recent literature. *Polymer International*, 53(11), 1585-1610. doi:10.1002/pi.1314
- Levchik, S., Piotrowski, A., Weil, E., & Yao, Q. (2005). New developments in flame retardancy of epoxy resins. *Polymer Degradation and Stability*, 88(1), 57-62. doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2004.02.019
- Levinta, N., Corobea, M. C., Vuluga, Z., Nicolae, C. A., Gabor, A. R., Raditoiu, V., ... & Teodorescu, M. (2020). Bio-based polyamide 1010 with a halogen-free flame retardant based on melamine–gallic acid complex. *Polymers*, 12(7), 1482. doi:10.3390/polym12071482
- Li, G., Wang, W., Cao, S., Cao, Y., & Wang, J. (2014). Reactive, intumescent, halogen-free flame retardant for polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(7), 40054. doi:10.1002/app.40054
- Liu, X., & Liang, B. (2017). Impact of a novel phosphorus-nitrogen flame retardant curing agent on the properties of epoxy resin. *Materials Research Express*, 4(12), 125103. doi:10.1088/2053-1591/aa9dba
- Lu, S. Y., & Hamerton, I. (2002). Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers. *Progress in Polymer Science*, 27(8), 1661-1712. doi:10.1016/S0079-6700(02)00018-7
- Luhar, S., Nicolaidis, D., & Luhar, I. (2021). Fire resistance behaviour of geopolymer concrete: An overview. *Buildings*, 11(3), 82. doi:10.3390/buildings11030082
- Marti, J., Idelsohn, S. R., & Oñate, E. (2018). A finite element model for the simulation of the UL-94 burning test. *Fire Technology*, 54(6), 1783-1805. doi:10.1007/s10694-018-0769-0
- Mozaffari, S. M., & Beheshty, M. H. (2018). Thermally-latent curing agents for epoxy resins: a review. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 31(5), 409-426. doi:10.22063/jipst.2019.1610
- Javid, M., & Thariq, M. (2018). Sustainable Composites for Aerospace Applications. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 1, 109-123.
- Niazi, M., & Beheshty, M. H. (2019). A new latent accelerator and study of its effect on physical, mechanical and shelf-life of carbon fiber epoxy prepreg. *Iranian Polymer Journal*, 28(4), 337-346. doi:10.1007/s13726-019-00704-8
- Pecht, M., & Deng, Y. (2006). Electronic device encapsulation using red phosphorus flame retardants. *Microelectronics Reliability*, 46(1), 53-62. doi:10.1016/j.microrel.2005.09.001
- Qian, X., Song, L., Bihe, Y., Yu, B., Shi, Y., Hu, Y., & Yuen, R. K. (2014). Organic/inorganic flame retardants containing phosphorus, nitrogen and silicon: Preparation and their performance on the flame retardancy of epoxy resins as a novel intumescent flame retardant system. *Materials Chemistry and Physics*, 143(3), 1243-1252. doi:10.1016/j.matchemphys.2013.11.029
- Rahimi-Aghdam, T., & Shariatinia, Z. (2018). Flame retardancy in polymeric materials: A short overview. *Basparesh*, 7(4), 38-47. doi:10.22063/BASPARESH.2017.1510
- Ray, S. S., & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science*, 28(11), 1539-1641. doi:10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002
- Rothon, R. N., & Hornsby, P. R. (1996). Flame retardant effects of magnesium hydroxide. *Polymer Degradation and Stability*, 54(2-3), 383-385. doi:10.1016/S0141-3910(96)00067-5
- Salmeia, K. A., & Gaan, S. (2015). An overview of some recent advances in DOPO-derivatives: Chemistry and flame retardant applications. *Polymer Degradation and Stability*, 113, 119-134. doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2014.12.014
- Serbezeanu, D., Vlad-Bubulac, T., Hamciuc, E., Hamciuc, C., Lisa, G., Anghel, I., ... & Preda, D-M. (2021). Study on thermal and flame retardant properties of phosphorus-containing polyimides. *Revista de Chimie*, 72(4), 13-21. doi:10.37358/RC.21.4.8452
- Schartel, B. (2010). Phosphorus-based flame retardancy mechanisms—old hat or a starting point for future development?. *Materials*, 3(10), 4710-4745. doi:10.3390/ma3104710
- Sonnier, R., Dumazert, L., Livi, S., Nguyen, T. K. L., Duchet-Rumeau, J., Vahabi, H., & Laheurte, P. (2016). Flame retardancy of phosphorus-containing ionic liquid based epoxy networks. *Polymer Degradation and Stability*, 134, 186-193. doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2016.10.009



- Trigo-López, M., Sanjuán, A. M., Mendía, A., Muñoz, A., García, F. C., & García, J. M. (2020). Heteroaromatic polyamides with improved thermal and mechanical properties. *Polymers*, 12(8), 1793. doi:10.3390/polym12081793
- Ullah, S., Bustam, M. A., Nadeem, M., Naz, M. Y., Tan, W. L., & Shariff, A. M. (2014). Synthesis and thermal degradation studies of melamine formaldehyde resins. *The Scientific World Journal*, 2014, 940502. doi:10.1155/2014/940502
- Van der Veen, I., & de Boer, J. (2012). Phosphorus flame retardants: properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis. *Chemosphere*, 88(10), 1119-1153. doi:10.1016/j.chemosphere.2012.03.067
- Varma, I. K., & Gupta, U. (1986). Curing of epoxy resin with phosphorylated diamine. *Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry*, 23(1), 19-36. doi:10.1080/00222338608063373
- Walters, R. N., & Lyon, R. E. (2008). *Flammability of polymer composites*. Washington, DC, USA: Office of aviation research and development, federal aviation administration.
- Wang, C. S., Berman, J. R., Walker, L. L., & Mendoza, A. (1991). Meta-bromobiphenol epoxy resins: Applications in electronic packaging and printed circuit board. *Journal of Applied Polymer Science*, 43(7), 1315-1321. doi:10.1002/app.1991.070430713
- Wang, C. S., & Shieh, J. Y. (1999). Phosphorus-containing epoxy resin for an electronic application. *Journal of Applied Polymer Science*, 73(3), 353-361. doi:10.1002/(SICI)1097-4628(19990718)73:3%3C353::AID-APP6%3E3.0.CO;2-V
- Wang, C. S., & Lin, C. H. (1999a). Properties and curing kinetic of diglycidyl ether of bisphenol A cured with a phosphorus-containing diamine. *Journal of Applied Polymer Science*, 74(7), 1635-1645. doi:10.1002/(SICI)1097-4628(19991114)74:7%3C1635::AID-APP4%3E3.0.CO;2-P
- Wang, C. S., & Lin, C. H. (1999b). Synthesis and properties of phosphorus-containing epoxy resins by novel method. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 37(21), 3903-3909. doi:10.1002/(SICI)1099-0518(19991101)37:21%3C3903::AID-POLA4%3E3.0.CO;2-X
- Wang, C. S., & Lee, M. C. (2000). Synthesis and properties of epoxy resins containing 2-(6-oxid-6H-dibenz (c, e)(1, 2) oxaphosphorin-6-yl) 1, 4-benzenediol (II). *Polymer*, 41(10), 3631-3638. doi:10.1016/S0032-3861(99)00541-8
- Wang, C. S., & Lin, C. H. (2000). Synthesis and properties of phosphorus containing advanced epoxy resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 75(3), 429-436. doi:10.1002/(SICI)1097-4628(20000118)75:3%3C429::AID-APP13%3E3.0.CO;2-U
- Weil, E. D., & Levchik, S. (2004). A review of current flame retardant systems for epoxy resins. *Journal of Fire Sciences*, 22(1), 25-40. doi:10.1177/0734904104038107
- Wu, X., Dong, C., Wirasaputra, A., Huang, H., Liu, S., Zhao, J., & Fu, Y. (2018). Imparting high flame retardancy to epoxy resin with ultra-low loading of 5, 10-dihydro-phenophosphazine-10-oxide functioned triazine. *High Performance Polymers*, 30(6), 742-751. doi:10.1177/0954008317723083
- Xiong, Y. Q., Zhang, X. Y., Liu, J., Li, M. M., Guo, F., Xia, X. N., & Xu, W. J. (2012). Synthesis of novel phosphorus-containing epoxy hardeners and thermal stability and flame-retardant properties of cured products. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(2), 1219-1225. doi:10.1002/app.34894
- Xiao, Y., Zheng, Y., Wang, X., Chen, Z., & Xu, Z. (2014). Preparation of a chitosan-based flame-retardant synergist and its application in flame-retardant polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(19), 40845. doi:10.1002/app.40845
- Xu, M., Zhao, W., & Li, B. (2014). Synthesis of a novel curing agent containing organophosphorus and its application in flame-retarded epoxy resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(23), 41159. doi:10.1002/app.41159
- Xu, Q., Chen, L., Harries, K. A., Zhang, F., Liu, Q., & Feng, J. (2015). Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests. *Construction and Building Materials*, 96, 416-427. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.062
- Xu, Y. J., Wang, J., Tan, Y., Qi, M., Chen, L., & Wang, Y. Z. (2018). A novel and feasible approach for one-pack flame-retardant epoxy resin with long pot life and fast curing. *Chemical Engineering Journal*, 337, 30-39. doi:10.1016/j.cej.2017.12.086



- Zhao, Q., Chen, C., Fan, R., Yuan, Y., Xing, Y., & Ma, X. (2017). Halogen-free flame-retardant rigid polyurethane foam with a nitrogen–phosphorus flame retardant. *Journal of Fire Sciences*, 35(2), 99-117. doi:10.1177/0734904116684363
- Zhou, T., He, X., Guo, C., Yu, J., Lu, D., & Yang, Q. (2015). Synthesis of a novel flame retardant phosphorus/nitrogen/siloxane and its application on cotton fabrics. *Textile Research Journal*, 85(7), 701-708. doi:10.1177/0040517514555801
- Zhang, Y. F., Liu, J. Z., Li, J., Wang, C. Y., & Ren, Q. (2022). Synthesis and storage stability investigation on curing agent microcapsules of imidazole derivatives with aqueous polyurethane as the shell. *Polymer Bulletin*, 79, 10295-10311. doi:10.1007/s00289-021-04063-4
- Zhong, Y., Wu, W., Lin, X., & Li, M. (2014). Flame-retarding mechanism of organically modified montmorillonite and phosphorous-Nitrogen flame retardants for the preparation of a halogen-free, flame-retarding thermoplastic poly (ester ether) elastomer. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(22), 41094. doi:10.1002/app.41094

